

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Navigace a metody měření polohy mobilních objektů

**Navigation and methods of measuring of location of
mobile objects**

Ostrava 2009

Bc. Jan Lukšík

Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....

Jan Lukšík

Datum odevzdání diplomové práce : 7. 5. 2009

Poděkování

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Zdeňku Macháčkovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním této práce.

Zároveň bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Kotzianovi, Ph.D. za pomoc týkající se problematiky použitého hw s mikrokontrolérem Freescale a také s použitím Jazyka C v CodeWarrior.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá principy navigace a zjišťování polohy mobilního objektu. Pojednává o jednoduchých principech užívaných v minulosti, které se velmi rychle v uplynulém století rozvinuly díky vývoji technologií. V krátkosti je vysvětlen princip dnes nejpoužívanější navigace GPS jako i přehled jiných principů navigace či metod zjišťování polohy.

V praktické části je řešen jeden způsob zjišťování polohy mobilního objektu založený na akustickém ultrazvukovém signálu, který umožňuje sledovat jeho aktuální polohu v kartézských souřadnicích, umožňujících využití k mnoha dalším účelům.

The dissertation (thesis) is about principles of navigation and detection of location of mobile object. It deals with simple principles used in the past, which evolved very quickly during the last century thanks to development of technologies. A principle of GPS, currently the most commonly used type of navigation, is explained briefly. And an overview of other methods of locating positions is presented.

A functional part of the thesis then contains a solution of another Method of indication of location of a mobile object. The method is based on acoustic ultrasonic signal. It enables to follow an actual location of the object using Cartesian coordinates, which can be used for many other purposes.

Klíčová slova

Navigace, měření polohy, akustika, akustický signál, zvuk, ultrazvuk, ultrazvukový přijímač, ultrazvukový vysílač, ultrazvukový měnič, souřadnice, souřadnicový systém, GPS, GLONASS, Galileo, trilaterace, mikrořadič, MCU, algoritmický výpočet polohy, SPL, ADAPT.

Navigation, mensuration positron, acoustic, acoustic signal, sound, ultarsound, ultrazvukový prijimac, ultrasonic transmitter, ultrasonic transducer, coordinate, GPS, GLONASS, Galileo, microcontroller, trilateration, MCU, algorithmic calculation location, SPL, ADAPT

Seznam použitých symbolů a zkratek

GPS - Global Positioning Systém

GLONASS – Ruská alternativa k GPS

Galileo – Evropská alternativa k GPS

GIS - Geografický Informační Systém

Trilaterace - určování relativní polohy objektů pomocí vztahů v trojúhelníku

MCU - mikrokontrolér

SMD – typ pouzdra el. součástky pro povrchovou montáž na plošných spojích

DIP – typ pouzdra el. součástky pro montáž pomocí vrtaných otvorů na plošných spojích

SPL - hladina akustického tlaku

Ultrazvuk - akustická část spektra ležící nad slyšitelným spektrem

UZ, uz – zkratka pro ultrazvuk

ADAPT - typ vývojové desky Adapt9S12E128 s MCU MC9S12E128

Obsah

1	Úvod	1
2	Stručná historie navigace.....	2
3	Metody používané k získávání poloh mobilních objektů - rozdělení.....	2
	3.1 Princip používající světelné záření.....	3
	3.2 Princip používající radiové vlny	3
	3.3 Princip používající akustických vln	7
4	Historie a milníky objevu ultrazvuku	8
	4.1 Počátky ultrazvukové techniky.	8
	4.2 Počátky a rozcestí ultrazvukové diagnostiky.	9
	4.3 Vývoj u nás.	10
5	Vlastnosti ultrazvuku a jeho zařazení v akustice.....	10
	5.1 Vlastnosti ultrazvuku	10
	5.2 Typické obory využití ultrazvukového spektra	12
6	Popis technického zadání praktické části.....	12
7	Rozbor návrhu systému	14
	7.1 Předpoklady aplikačního použití.....	14
	7.2 Použité metody výpočtu algoritmu	16
	7.3 Vyvinutý matematický algoritmus	17
8	Technické řešení – návrh ultrazvukového vysílače	18
	8.1 HW řešení.....	18
	8.2 SW řešení	19
	8.3 Výkonový modul ultrazvukového zářiče	21
9	Technické řešení – návrh ultrazvukového přijímače	22
	9.1 HW řešení.....	23
10	Technické řešení – vyhodnocovací zařízení.....	27
	10.1 HW řešení.....	27
	10.2 SW řešení	30
	10.3 Výstupní protokol.....	32
11	Technické řešení – zkušební verze	33
	11.1 Vysílač na kontaktním poli	33
	11.2 Přijímač na kontaktním poli	33
	11.3 Distribuční deska na kontaktním poli.....	34
12	Vývojová verze a ověření systému.....	35
	12.1 Sestava vývojové verze	35
	12.2 Ověření systému.....	37
13	Závěr	40
14	Použitá literatura.....	42

1 Úvod

Co si představit pod pojmem „Navigace a metody měření polohy mobilních objektů“ ?

Navigace je název pro činnost vedoucí k určení nebo zjištění polohy. Tato činnost lidstvo provází celou dobu co existuje. Již v dávných dobách se člověk orientoval podle, pro něj, statických bodů (podle jasně rozeznatelných stromů či mohutných kamenů, hor, kopců, ... , či hvězd). Jsou známé poznatky o znalostech vcelku velmi dobré orientace starých národů podle hvězd. Navigace se tehdy využívala na cestách k určení správného směru na souši i na vodě. Jedním velmi známým navigačním prostředkem, který umožnil cestování a plavbu po mořích a oceánech i za dlouhého nepříznivého počasí je kompas, jehož objev byl učiněn v Číně a odtud také rozšířen do celého světa. Tento objev provázel vyvíjející se civilizaci nezastupitelně až do 20. století, ve kterém se navigace zdokonalila pomocí družic a elektroniky natolik, že téměř vytlačila kompas, který se stal (s trochou nadsázky) jednoduchým nouzovým řešením při selhání elektroniky. Při trošce ironie můžeme říci, že se opět řídíme pomocí hvězd (satelitů). Tyto moderní elektronické navigační přístroje (např.: GPS) jsou natolik jednoduše ovladatelné a vnitřně sofistikované, že umožňují zjišťovat polohu i neznalým osobám nebo poskytovat data o poloze pro zcela automatizované řídicí procesy, vykonávající pak různé činnosti.

Tato diplomová práce řeší jeden ze způsobů zjišťování polohy mobilního objektu, a to pomocí ultrazvuku. Cílem je tedy sestavit (sestrojít) vývojovou verzi zařízení pro zjišťování polohy mobilního objektu, která by uměla zjistit jeho polohu v kartézských souřadnicích reprezentovaných dvěma celými čísly.

V první části je stručně uvedena historie navigace a používané metody pro získávání polohy mobilních objektů, ze kterých je více rozebrána metoda zvaná GPS pro podobnost některých jejích částí s uváděnou metodou ultrazvukovou. Dále jsou stručně uvedeny vlastnosti ultrazvuku a jeho zařazení v akustickém vlnění a jeho spektru.

V druhé části je podrobněji popsáno technické zadání realizovaného řešení a teoretická úvaha návrhu systému, kde je uveden jednoduchý model prostorového řešení a algoritmický matematický postup.

V třetí části je prakticky řešen uvedený model. Jsou zde uvedeny jednotlivé části HW a SW řešení, vysvětlena jejich funkce a také schémata, z nichž je patrná jejich funkce. V této části jsou také uvedeny výsledky měření a zkoušky.

Tato práce je zaměřena na takový způsob snímání polohy pomocí ultrazvuku, který není v literatuře v této podobě téměř vůbec řešen a proto značná část této práce má vývojový až experimentální charakter.

2 Stručná historie navigace

Navigace a metody měření polohy se více začaly rozvíjet s rozvojem motorizovaného pohybu, kde bylo potřebí různými metodami zjistit určitou polohu vůči danému bodu bez přítomnosti člověka. Například orientace polohy bodu v kruhu pomocí vaček, či počítadel zubů na ozubených kolech, apod.. Později pak elektrickým či elektronickým vyhodnocováním odměřených hodnot, pracujících na čítacím, odporovém, kapacitním či indukčním způsobu, převedeném na některý vhodný zobrazovací způsob, až po nynější bezdrátová zařízení, která fungují na principu akustického, radiového, či světelného vlnění a záření.

Dnes je informace o prostorové poloze pro celou řadu lidských činností naprosto potřebnou a tím i cennou informací sloužící k popisu reality kolem nás. Tyto informace samy o sobě mají význam pro úzkou skupinu lidí, avšak použijí-li se tyto informace v kontextu se souhrnem dalších informací vytváří se významná platforma pro popisování celých systémů, které jsou součástí našeho běžného života. Například spojí-li se získaná data o prostorové poloze s daty popisného charakteru prostřednictvím softwarových nástrojů pro jejich třídění a analýzu, vzniká geografický informační systém (GIS), vytvářený za účelem získávání nových informací pro široké spektrum oblastí lidské činnosti, např. životní prostředí, ekonomika, doprava, atd. Určování prostorové polohy technologií Globálního polohového systému (GPS) je v současné době velmi rozšířené nejen v geodetických aplikacích. Z globálního hlediska je význam GPS jednoznačný a převratný. V lokálních aplikacích družicová technologie GPS svými možnostmi a rychlostí zjištění prostorové polohy silně konkuruje klasickým geodetickým technologiím a postupně je vytlačuje. GPS je cenově stále více dostupný širokému spektru uživatelů, díky stálému poklesu cen užítých komponentů. Hardwarově a softwarově je díky vysokému stupni integrace a automatizace procesu měření a výpočtu, uživatelsky relativně jednoduchý a příjemný na obsluhu. V geodetických aplikacích již není doménou jen pro budování bodových polí, ale stále častěji se využívá v reálném čase pro podrobné měření. Vzhledem k tomu, že měření GPS je ovlivňováno celou řadou faktorů, je třeba se zabývat vypovídající schopností výsledků, zejména jejich přesností, spolehlivostí a uživatelskou čitelností. Jinou možností a typem užití je použití ultrazvuku místo radiových vln, čehož se využívá v hojnosti k získávání prostorových, objemových či délkových informací o hmotných objektech a jejich vzdálenostech.

Tyto dvě metody či způsoby jsou dnes nejčastěji využívány k získávání údajů o polohách objektů či jejich velikostech a objemech.

3 Metody používané k získávání poloh mobilních objektů - rozdělení

Jak již bylo v úvodu uvedeno, užívá se dnes k určování polohy, nejčastěji dvou základních metod či způsobů (je zde myšleno samozřejmě bezdrátových způsobů). Další třetí je v ranném stádiu vývoje.

- ✓ světelné záření (využití obrazu)

- ✓ radiové vlny
- ✓ akustické vlny – přesněji ultrazvuková část vlnění

Použité způsoby mají spoustu faktorů společných:

- ✓ šíří se vzduchem či prostorem
- ✓ k vysílání měřicí veličiny se používá vlnových vysílačů
- ✓ k příjmu měřicí veličiny se používá vlnových přijímačů
- ✓ zpracování signálů je možné použít stejných výchozích metod

A přesto se tyto způsoby dosti zásadně liší:

- ✓ maximálním dosahem
- ✓ přesností
- ✓ způsobem zpracování signálu
- ✓ možnostmi použití
- ✓ již uvedenou použitou měřicí veličinou

3.1 Princip používající světelné záření

Užití světla k určení polohy mobilního objektu na podobném principu jako je radiový a zvukový, jež jsou popsány níže, se nevyužívá vzhledem k jeho odlišným vlastnostem. Využití je však možné provádět jinou formou a to fotografickou z jednoho místa nebo lépe z více míst v jednom časovém okamžiku, kdy lze získat na základě známých objektů v obraze další informace porovnáváním. Tato metoda má velké perspektivy, zvláště je-li použito výpočetní techniky. Použití počítačů umožňuje pořizovat snímky nejen z více míst ve stejném časovém okamžiku, ale i z jednoho místa na pohybujícím se objektu. Tato možnost, pokud se zvolí vhodný známý časový odstup jednotlivých snímků s vhodnou známou rychlostí i vhodným známým zrychlením pohybu, je do budoucna velmi perspektivní, jelikož vlastně umožní mobilním objektům vidět. Potom lze na těchto základech vyhodnocovat vzdálenosti, velikosti objektů či aktuální polohu a zároveň zachovat úplnou vizuální informaci. Vzhledem k tomu, že obrazové informace jsou časově nejnáročnější na zpracování a vyhodnocování z důvodu velkého množství provedených operací, jsou tyto systémy teprve na samém počátku vývoje.

Běžně se však využívá usměrněný, bodový paprsek (laser), kterým je možné odrazem měřit vzdálenost objektu. Náročnost na výpočty tohoto způsobu měření je poměrně malá a zvládnou ji dnes i poměrně pomalé počítače či běžné jednočipové počítače a mikrokontroléry.

3.2 Princip používající radiové vlny

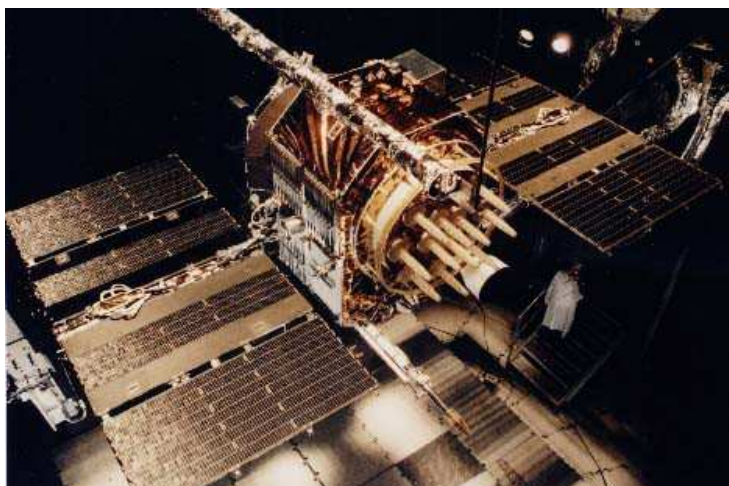
Tento princip využívá jako měřicí médium radiové vlny (přesněji modulované radiové vlny). K určení polohy pro 2D prostor tímto způsobem je zapotřebí minimálně tři radiových vysílačů rozmístěných nejlépe tak, aby se daný mobilní objekt s přijímačem nacházel uvnitř vytvořeného trojúhelníku. Poloha vysílačů je přitom známá a tím jsou známy i poměry v trojúhelníku. Pro určení polohy ve 3D prostoru je tedy limitována minimem 4 radiových vysílačů. Každý další vysílač jen zpřesní výpočet polohy.

Tento systém se již dlouhá léta využívá k navigaci a určení polohy. Níže jsou uvedeny alespoň některé nejznámější:

- ✓ Systém GPS - Global Positioning System je původně vojenský polohový družicový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, jehož vývoj začal roku 1973. Později bylo jeho používání uvolněno i do civilního sektoru. Tento systém je projektován na 24 družic, ale nyní se využívá až 32 družic, rozmístěných ve výšce 20200 km nad zemským povrchem na 6-ti kruhových drahách se sklonem 55° , které jsou vzájemně posunuty o 60° . Na každé dráze je 5-6 nepravidelně rozmístěných družic se zvolenou oběžnou periodou kolem země 11h 58min a rychlostí 3,8km/s. Pro vlastní navigaci je využito dvou vysílacích pásem zvaných L1 a L2. L1 na frekvenci 1575,42MHz je využit pro civilní i vojenský sektor. L2 na 1227,62MHz byl původně pouze pro vojenský sektor, avšak postupně uvolněn i pro civilní sektor. Více technických parametrů viz [\[1\]](#).
- ✓ Systém GLONASS - Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema -> globální družicový polohový systém vyvinutý a provozovaný od r. 1982 ruskou armádou. Tento systém má určité podobnosti se systémem GPS, je projektován na 24 družic obíhající ve výšce 19100 km nad povrchem Země na třech kruhových drahách se sklonem 65° , které jsou vzájemně posunuté o 120° . Na každé ze třech drah je symetricky umístěno 8 družic po 45° . Družice se pohybují rychlostí 3,9km/s s dobou oběhu 11h 15min. Část tohoto systému je uvolněna k použití civilním sektorem. Více technických parametrů viz [\[2\]](#).
- ✓ Systém Galileo je dalším systémem, který bude provozovat Evropa. Jeho uvedení do provozu je plánováno na rok 2010. Princip je podobný jako u systému GPS a GLONASS s tím, že se mohou vzájemně doplňovat, nebude však provozován armádou. Je projektován na 30 družic, rozmístěných ve výšce 23500 km nad zemským povrchem ve 3 rovinách po kruhových drahách. Každá z rovin dráhy bude svírat s rovinou rovníku úhel 56° , což umožní využívat navigační systém bez potíží až do míst ležících na 75° zeměpisné šířky. Systém umožní určit polohu s přesností lepší jak 1metr. Veřejně regulovaná služba (PRS) je realizována dvěma signály o frekvencích 1575,42 MHz a 1278,75 MHz. Více technických parametrů viz [\[3\]](#).
- ✓ Dále existuje další projekt spravovaný Čínou zvaný Compass (Beidou) a IRNSS spravovaný Indií. Oba tyto systémy jsou lokální se stacionárními družicemi pracující na odlišném principu komunikace a měření.

Systémy GPS, GLONASS a GALILEO pracují na obdobném principu, jsou to pasivní systémy. Po jednáních s USA bylo dosaženo dohody o kompatibilitě systému Galileo s GPS a jejich zastupitelnost či ověřitelnost polohy ze dvou zdrojů je nesporná.

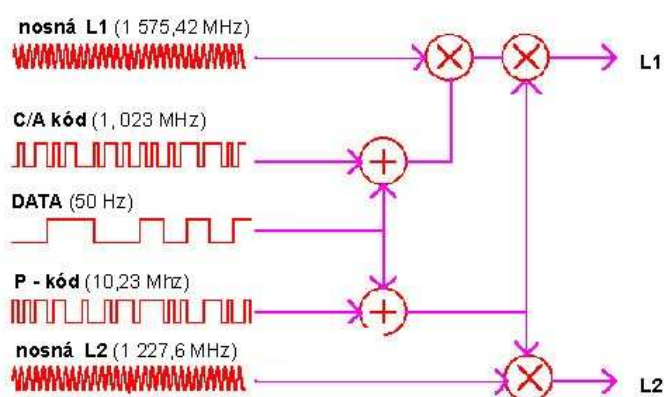
Princip je vysvětlen na zařízení GPS níže.



Obr. 3.2.1 Družice systému GPS.

Systém GPS pracuje pouze jednosměrně, tedy družice vysílají a pozemské stanice přijímají. Pro přenos signálů družic jsou vyhrazeny dva kmitočty: první s hodnotou 1575,42 MHz a s označením L1 a druhý pak na 1227,60 MHz s označením L2. Signál je modulován kódovou posloupností, podle ní přijímač jednotlivé satelity dokáže rozlišit. Na kanálu L1 se používá kód C/A (Coarse Acquisition) a současně i kód P. Kódová posloupnost P-code se používá pro vojenské účely a pomocí ní je také zakódován kanál L2. Každá z družic vysílá současně na obou kanálech, ale běžné přijímače pracují pouze s kanálem L1. Druhý kanál L2 se používá současně s L1 pro velmi přesná měření.

Jak vzniká signál pro oba kanály GPS je naznačeno na následujícím obrázku. Kódová posloupnost C/A popř. P datový signál nejprve rozprostře a takto upravený signál se pak modulací posune na nosnou vlnu o patřičné frekvenci. Data jsou rozdělena do tzv. zpráv, které jsou dále rozděleny do 25 rámců o celkovém trvání 12,5 min. Rámec o celkové délce 1500 bitů (30 sekund) se skládá z pěti subrámců délky 300 bitů. Data se vysílají rychlostí 50 Hz.

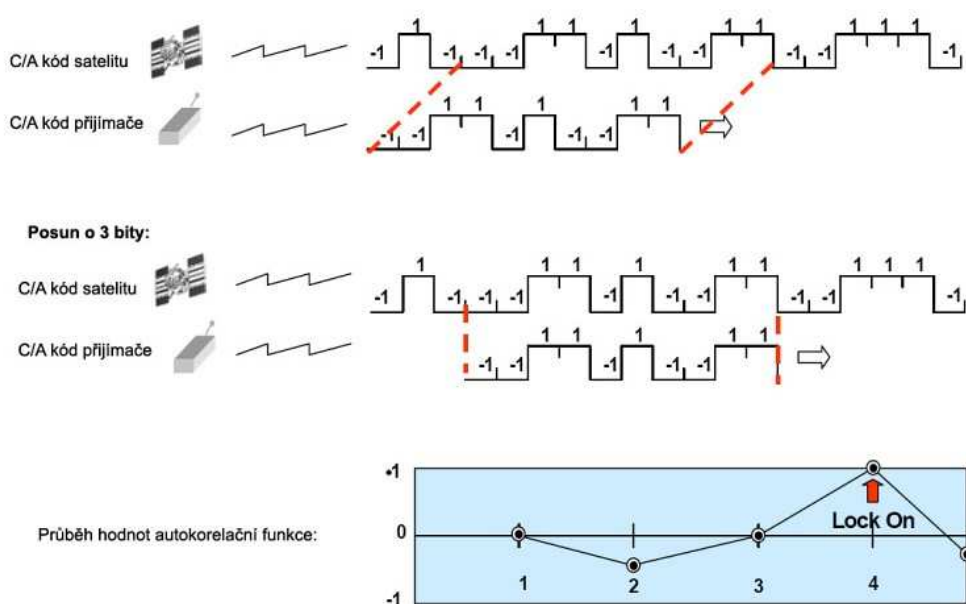


Obr. 3.2.2 Vznik signálu GPS.

Každý satelit posílá také zprávu o své poloze vyjádřenou tzv. efemeridou, což je astronomické přesné určení polohy kosmického tělesa v určitém čase, přesný údaj o čase, dále

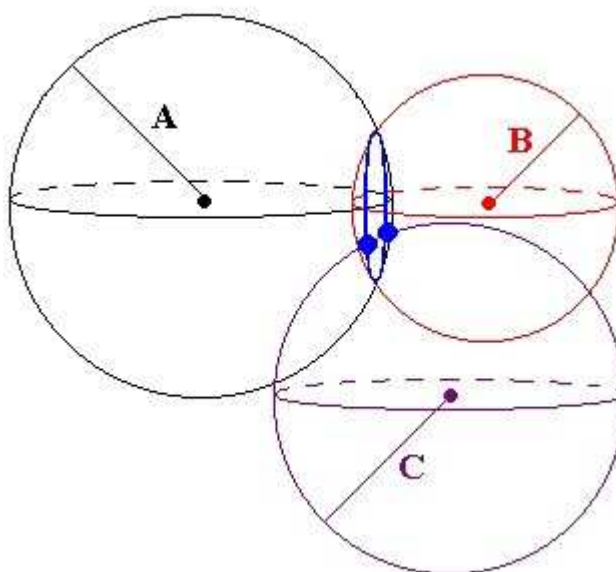
odhad zpoždění signálu v ionosféře a ještě celou řadu dalších údajů. Mimoto vysílají satelity tzv. almanach, což je vlastně databáze dalších satelitních stanic.

Tuto databázi si přijímač GPS uloží do paměti ihned po přihlášení a dále si ji aktualizuje. V databázi jsou uloženy kódy okolních satelitů a i jejich přibližná poloha, z níž si přijímač umí odhadnout, kdy se zhruba mohou objevit na horizontu. Několik nejbližších kódů si pak přijímač ponechá jako aktuální a každý přijatý signál GPS s nimi porovnává. Činí tak prostřednictvím matematické operace zvané autokorelace a posouváním posloupností o jednotlivé bity vpřed či vzad. Pokud se signál nějaké družice shoduje s uloženým kódem, přijímač se na něj tzv. „zamkne“. Princip je naznačen na obrázku níže. Při synchronizaci obou signálů pak přijímač dokáže spočítat dobu cesty signálu od družice.



Obr. 3.2.3 Synchronizace signálu přijímače a družice.

Samotný princip určení polohy je docela jednoduchý. Přijímač si nejprve vypočte vzdálenost, která jej dělí od několika okolních družic, a to z doby cesty signálu a z rychlosti světla včetně započítání vlivů atmosféry. Princip přesného určení polohy je naznačen na obrázku níže. Pokud tedy zná přijímač zatím jen vzdálenost k jedné z družic, předpokládá dle pravidel geometrie, že sám leží někde na plášti koule s poloměrem rovným dané vzdálenosti, jejíž střed tvoří daná družice, na obrázku např. koule A. Pokud ale zná vzdálenost i k jinému satelitu, např. B, může vypočítat průnik povrchů koule, což je už jen kružnice. Se třetí koulí se možnost polohy zúží pouze na dva body, přičemž jeden z nich leží buď vysoko v prostoru nebo hluboko v Zemi a může se škrtnout.



Obr. 3.2.4 Ilustrace principu trilaterace.

Tomuto postupu se říká trilaterace. V praxi je situace oproti modelovému příkladu složitější, protože s měřením a počítáním vzdáleností vznikají nepřesnosti. Proto se k určení polohy používá vždy nejméně čtyř družic. Chyby mohou vzniknout jednak odchýlením se od skutečné hodnoty rychlosti šíření signálu atmosférou, ale také samotnou družicí, pokud pošle nesprávné či nepřesné údaje. Aby se tomu zamezilo, má každá z družic své vlastní přesné atomové hodiny. Na správnou polohu družic dohlíží také pozemní řídicí systém, který polohu a pohyb družic sleduje a koriguje. [4], [1].

3.3 Princip používající akustických vln

Tato metoda využívá jako měřicí médium ultrazvukové vlnění. Toto ultrazvukové vlnění vyskytující se nad slyšitelným zvukovým spektrem v pásmu nad 20kHz má podobné vlastnosti šíření jako slyšitelný signál o vyšších frekvencích, je však více směrový a lépe se odráží od pevných tvrdších překážek. Lze ho tedy s výhodou využít jako základního média pro určování polohy mobilních objektů.

Použití ultrazvuku k těmto účelům je však limitováno jeho vlastnostmi a způsobu použití:

- ✓ Dosah – maximálně několika málo set metrů (ale spíše desítky metrů)
- ✓ Přesnost – dána schopností zpracování systému běžně v cm (závislá na použité metodě)
- ✓ Podmínky použití – omezení na prostory, kde nevádí použití ultrazvuku (zvířata a citlivé přístroje zpracování zvuku)

U ultrazvuku je situace poněkud více různorodá. Používá se zde různých způsobů vztažených k mobilnímu objektu (zdali dává o sobě vědět):

- ✓ Pasivní metoda obdobná jako u GPS, avšak metoda kódování (rozlišení) jednotlivých ultrazvukových vysílačů se děje jiným způsobem (např. kmitočtem ultrazvuku).

- ✓ Aktivní metoda, kdy na mobilním objektu je ultrazvukový vysílač, který se nachází uprostřed několika ultrazvukových přijímačů.
- ✓ Aktivní metoda pomocí odrazu od překážky. Těto metody se nejčastěji využívá ke zjišťování vzdálenosti od překážek.

Pro ultrazvukový systém je možné využít analogicky stejný princip práce jako pro GPS navigaci s tím, že se používá místo radiových vln ultrazvuku nebo je možné využít jiného matematického postupu, jako je např. metody Pythagorovy věty a poměrů v trojúhelníku jež jsou vhodnější pro rovinné plochy. Tomu je pak přizpůsoben celý systém. Pro vysílání se používá ultrazvukových vysílačů a pro příjem pak ultrazvukových přijímačů. Je možné použít i ultrazvukových širokopásmových reproduktorů a mikrofonů pro snadnější odlišení vysílačů při použití jiných frekvencí.

Pro výpočty je možné použít obdobných algoritmů a postupů jako při výpočtech GPS navigace.

Více je o metodě snímání polohy mobilního objektu pomocí ultrazvuku pojednáno v dalších kapitolách a také v popisované praktické části.

4 Historie a milníky objevu ultrazvuku

O existenci ultrazvuku se věda přesvědčila již v minulém století, avšak na dosti dlouhou dobu se ocitl v depozitáři fyzikálních hříček. Později se jím zabývali i velmi významní fyzikové (např. P. Langevin), jiní k poznání jeho vlastností přispěli nepřímo (lord Rayleigh), avšak povětšinou zůstal stranou zájmu vůdčích osobností vědy, a to i poté, co se ukázalo, že již zdaleka není jen fyzikální hříčkou. Příběhy lidí sestavujících mozaiku poznání o ultrazvuku nevzbudily zájem mistrů pera a nestaly se náměty pro televizní filmy. Ultrazvuk nemá svého Konráda Roentgena ani Ludvíka Pasteura. Přesto však bude na místě připomenout některé osobnosti, které se významnou měrou podílely na jeho poznání, i klíčové momenty, které rozhodly o dalších směrech jeho výzkumu a využití.

4.1 Počátky ultrazvukové techniky.

Zdrojem ultrazvukového signálu byly až do skončení první světové války nejrůznější sirény, píšťaly a vodní trysky. Největší pozornost se nejprve soustřeďovala na ultrazvuk jež se šíří plyny a tuhými tělesy. Pro získání kmitů o frekvencích stovek kHz a vyšších tehdy chyběly vhodné zdroje. Je tedy více jak zřejmé, že nejdůležitějším mezníkem na cestě poznání ultrazvuku bylo zkonstruování piezoelektrických měničů, jakožto principu, který se vlastně pro tvorbu ultrazvuku využívá až dodnes. První piezoelektrický měnič jako zdroj ultrazvuku je připisován známému francouzskému fyzikovi P. Langevinovi, který jej zkonstruoval v r. 1916 a o rok později tento princip publikoval. Avšak vlastní piezoelektrický jev objevili bratři Curieové již v r. 1880. Teprve tehdy se dalo dobře využít piezoelektrických zdrojů pro vyzařování ultrazvuku i do kapalného prostředí. Největší výhodou piezoelektrického měniče byla snadná přizpůsobitelnost frekvence a poměrně jednoduchá řiditelnost výkonu pomocí elektrického napětí. V r. 1918 si P. Langevin a

N.C. Chilowsky patentovali první použitelný systém pro podmořskou ultrazvukovou echolokaci. Značným zdokonalením piezoelektrických zdrojů ultrazvuku byla později konstrukce měniče s fokusací (J. Gruetzmacher v r. 1935), což umožnilo získávání ultrazvuku o extrémně vysokých intenzitách v malých objemech kapaliny. Alternativní mechanismus, kterým lze získávat zejména nízkofrekvenční ultrazvuk, je magnetostrikční jev objevený J.P. Joulem v r. 1847. Magnetostrikční vibrátor se však jako zdroj ultrazvuku objevuje až v průběhu dvacátých let. Asi nejvýznamnější jeho konstrukci patrně sestrojil Američan G.W. Pierce (britský patent v r. 1928) [5].

4.2 Počátky a rozcestí ultrazvukové diagnostiky.

Vše začalo Langevinovým sonarem a nástupem elektroniky a jejím dalším rozvojem. Generátory vysokofrekvenčního elektrického proudu a elektronické zesilovače byly nutnou podmínkou pro další rozvoj těchto zařízení. V r. 1928 obdržel autorské osvědčení ruský fyzik S.J. Sokolov na průchodovou metodu detekce skrytých vad materiálu, jež byla později propracována ke značné dokonalosti a využívá se i dnes. Rozhodující význam pro technické i lékařské vědy však měla práce Američana F.A. Firestonea z počátku čtyřicátých let, který zkonstruoval ultrazvukový odrazový defektoskop (patenty v USA 1942, 1943) jakožto předchůdce dnešních lékařských a průmyslových ultrazvukových zobrazovacích systémů. Defektoskop (tehdy označovaný jako reflektoskop) již byl vybaven osciloskopem, na jehož obrazovce bylo možno zviditelnit odrazy ultrazvuku od akustických rozhraní, tj. vad materiálu, jako jsou různé praskliny a dutiny ve zkoumaném tělese. Asi nejvýznamnější vědeckou osobností v oblasti aplikovaného výzkumu ultrazvuku v druhé polovině třicátých let byl R. Pohlman, který zkonstruoval tzv. Pohlmanův článek tvořený tenkou vrstvou suspenze velmi malých tenkých plátků hliníku ve vhodné kapalině. Tento Pohlmanův článek umožnil v daném místě zobrazit dvojrozměrný obraz intenzity dopadajícího ultrazvuku, podobně jako vidíme hustotu dopadajícího rentgenového záření na vyvolaném filmu. Tohoto článku využil k zobrazení mozkových komor K. T. Dussik ve svojí metodě v roce 1937 a rozhodující článek publikoval v r. 1942. Dnes je obraz získaný průchodem ultrazvuku přes tkáň lidského těla zviditelňován elektronickou cestou.

Odrazová diagnostická metoda byla výrazněji do medicíny aplikována G.D. Ludwigem a F.W. Struthersem v r. 1949, kteří získali odrazy od cizích těles a žlučových kamenů v těle. Další práce se ojediněle objevovaly v průběhu padesátých let, přičemž jednorozměrné a dvojrozměrné zobrazení se rozvíjelo prakticky paralelně. Přístroj pro dvojrozměrné zobrazení byl poprvé popsán J.J. Wildem v r. 1950 a dále Wildem a J.M. Reidem v r. 1952, respektive v téže roce D.H. Howrym a W.R. Blissem. Ve Velké Británii a Japonsku se začátkem šedesátých let objevily první komerční ultrazvukové lékařské přístroje pro dvojrozměrné zobrazení, které se pak až do poloviny let sedmdesátých postupně zdokonalovaly.

Od padesátých let se také rozvíjela metoda založená na Dopplerově principu ultrazvuku (Ch. J. Doppler), která umožňuje zjišťovat směr a rychlost pohybu struktur odrážejících ultrazvuk. První aplikace sloužily k detekci pohybu srdečního svalu (S. Satomura, 1957) a od konce padesátých let převažuje dopplerovské měření rychlosti toku krve (S. Satomura, 1959, resp. D.E. Franklin a spol. v r. 1961). Ultrazvuk se odráží od masy pohybujících se červených krvinek v krevním řečišti. Dopplerovské měření toku krve se stalo v současnosti nejpoužívanější metodou sloužící pro tento účel. V roce 1974 byla vydána práce F.E. Barbera a jeho spolupracovníků, v níž je referováno o duplexním systému, který spojuje výhody dvojrozměrného B-zobrazení a měření

dopplerovského signálu z proudící krve. V té době začal ultrazvuk poměrně silně vytlačovat z hlavního záběru zobrazovací metody založené na rentgenovém záření, a to vzhledem ke své nepatrné rizikovosti, zejména v gynekologii a porodnictví [5].

4.3 Vývoj u nás.

První vědecké práce o účincích ultrazvuku (na rostlinný materiál) u nás počátkem čtyřicátých let publikovali významní brněnští lékaři a vědci F. Herčík (budoucí zakladatel Biofyzikálního ústavu Akademie věd ČR), J. Šprindrich (tehdejší ředitel Léčebny nádorů v Brně), T. Martinec (mikrobiolog, budoucí rektor Masarykovy university) a M. Hrdlička, avšak o něco dříve již pojednala v naší literatuře o technických a biologických aspektech ultrazvuku J. Šimonová - Čerovská. Asi nejvíce prioritních výsledků bylo získáno v kolektivech vedených I. Hrazdírou. Největší citovanost zaznamenaly práce věnované buněčným a molekulárním účinkům ultrazvuku. Mezinárodním uznáním jeho přínosu ke studiu biologických účinků ultrazvuku je jeho dlouhodobé členství v odborné skupině pro bezpečnost ultrazvukových aplikací při Evropské federaci společností pro ultrazvuk v medicíně a biologii (EFSUMB). V druhé polovině šedesátých let se objevila řada článků o terapeutických i diagnostických aplikacích ultrazvuku v plastické chirurgii (J. Pospíšilová a j.). V 60. letech dosáhla mezinárodního uznání škola E. Černého v oblasti ultrazvukové léčby Ménierovy choroby. V oblasti ultrazvukového vyšetřování oka vynikl v mezinárodním měřítku J. Vanýsek (detekce cizích těles v oku v r. 1955) a J. Preisová. Největší zásluhy o rozvoj ultrazvukové diagnostiky u nás má E. Čech (zejména ultrasonografie v porodnictví) a M. Nevrtal (dopplerovské metody). Od sedmdesátých let výrazně přispěl rozvoji ultrazvukové měřicí techniky obraz a postupně rozvíjející se počítačová technika. V oblasti výzkumu ultrazvukové kavitace a jejích teoretických modelů dosáhla mezinárodního uznání škola O. Taraby a L. Samka, zejména pak jejich práce z let sedmdesátých a osmdesátých. [5]

5 Vlastnosti ultrazvuku a jeho zařazení v akustice

Pro praktickou část diplomové práce „Navigace a metody měření polohy mobilních objektů“ byla vybrána metoda ultrazvuková s aktivním přístupem mobilního objektu do měřicího systému, kdy na mobilním objektu je ultrazvukový vysílač, který se nachází uprostřed několika ultrazvukových přijímačů (v našem případě čtyřech).

5.1 Vlastnosti ultrazvuku

Úvodem budou uvedena známá data a vlastnosti ultrazvuku včetně jeho způsobů šíření v prostoru:

- ✓ Ultrazvuk zařazujeme do vědního oboru zabývající se akustikou a platí pro něj stejné zákonitosti jako pro slyšitelný zvuk.
- ✓ Ultrazvuk (stejně jako infrazvuk i slyšitelný zvuk) je definován jako pohyb hmotných částic či mechanické kmitání hmotných částic pružného prostředí, které lze vnímat, snímat či zaznamenat. Jde tedy o mechanicky šířené vlnění. Nás zajímá především šíření ultrazvuku v plynech.
- ✓ Může se šířit ve všech materiálech. Závisí pouze na vlastnosti materiálu předávat toto vlnění dále nebo jinak řečeno na jeho schopnosti toto vlnění tlumit.

- ✓ V akustice rozlišujeme:
 - Infrazvuk – $f < 20\text{Hz}$. Projevuje se chvěním. Vnímáme jej hmatem.
 - Zvuk - $20\text{Hz} < f < 20\text{kHz}$. Slyšitelná část akustických vln. Vnímáme jej sluchem.
 - Ultrazvuk - $f > 20\text{kHz}$. Při vyšších frekvencích a vyšších intenzitách narušuje hmotu (např. kameny). Lze např. vnímat pouze jako součást vyšších harmonických u některých nástrojů apod.. Mohou být také vnímány některými jedinci jako nepříjemný pocit. Je také slyšen psy nebo využíván netopýry.
 - ✓ V akustice jsou považovány všechny tři tyto části za součást zvukového spektra se kterým se pracuje, jak při kvalitním ozvučování, tak při tvorbě kvalitních poslechových prostorů.
 - ✓ Pro projev zvuku v nižších frekvencích spektra je v akustice vyžadováno větších objemů zářičů i prostorů, ale směrem k vyšším frekvencím spektra se tato potřeba rozměrů snižuje a mění se i metody tvorby těchto zvuků.
 - ✓ Rychlost šíření akustického kmitání je rozličná a závisí na materiálu jehož se využívá. Níže jsou uvedeny vlastnosti šíření tohoto vlnění v některých látkách okolo 20°C :
 - Vakuum kmitání se nešíří (není jak)
 - Vzduch 343 ms^{-1}
 - Kyslík 317 ms^{-1}
 - Vodní pára 405 ms^{-1}
 - Vodík 1270 ms^{-1}
 - Benzín 1170 ms^{-1}
 - Voda 1475 ms^{-1}
 - Mořská voda 1500 ms^{-1}
 - Beton 1700 ms^{-1}
 - Led 3200 ms^{-1}
 - Dřevo bukové, dubové 3400 ms^{-1}
 - Cihly 3600 ms^{-1}
 - Sklo 5200 ms^{-1}
- [\[6\]](#)
- ✓ Přehled hladin akustického tlaku. Zdálo by se, že pro ultrazvuk tento údaj nemá smysl, ale pravidla amplitudy kmitání a tím i vyvolaného akustického tlaku platí i pro ultrazvuk a lze jej měřit, tak tedy alespoň subjektivně pro srovnání k uvědomění si úrovně těchto tlaků v uchem poměřitelné úrovni, k uvědomění si vlivu ultrazvuku na organismy které jej vnímají.
- $L = 20\log(p/p_0)$ L – hladina akustického tlaku, p – akustický tlak, p_0 – prahový akustický tlak $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\text{ Pa} = 0,000\,02\text{ Pa}$
- 0 dB práh slyšení
 - 10 dB šumění listů při slabém větru
 - 20 dB klidná zahrada
 - 30 dB šepot, velmi tichý byt a velmi tichá ul.

- 30 - 35 dB relativní ticho v obsazeném hl. kina
- 40 dB malý šum v bytě
- 40 - 60 dB obvyklá mluva, živá ulice
- 40 - 70 dB hluk v kancelářích a obchodech
- 40 - 80 dB reprodukováná hudba v uzavřené místnosti
- 50 - 80 dB hluk v autech, tramvajích a žel. vozech
- 70 dB hlučný hostinec, živější ul., potlesk v sále
- 80 dB velmi silná reprod. hudba, velmi živá ulice
- 20 - 80 dB velký orchestr
- 80 - 100 dB hluk v kabině letadla
- 100 dB nýtování, motocykl bez tlumiče
- 110 dB kovárna kotlů, pneumatická kladiva
- 120 dB hluk letadla ze vzdáleností asi 20metrů
- 130 dB práh bolesti

[\[6\]](#)

5.2 Typické obory využití ultrazvukového spektra

- ✓ výroba skla a optici - odmašťování a čištění skel, čoček a optických soustav
- ✓ automobilový průmysl - čištění stříkacích pistolí, vstřikovacích trysek, karburátorů, tlumičů, součástek motorů, plošných spojů, optických soustav a
- ✓ elektrotechnický průmysl - čištění plošných spojů, kontaktů a jiných součástek
- ✓ strojírenský průmysl - čištění a odmašťování ložisek, ozubení, kloubů, filtrů, forem a jiných strojírenských součástí
- ✓ jemná mechanika - čištění nerezových, mosazných a hliníkových dílů a jejich sestav
- ✓ restaurace - čištění a odmašťování sifonů, čištění kouřových filtrů aj.
- ✓ zdravotnictví a medicína - čištění protéz, implantátů, lékařských nástrojů a využití ve vyšetřovacích přístrojích

6 Popis technického zadání praktické části

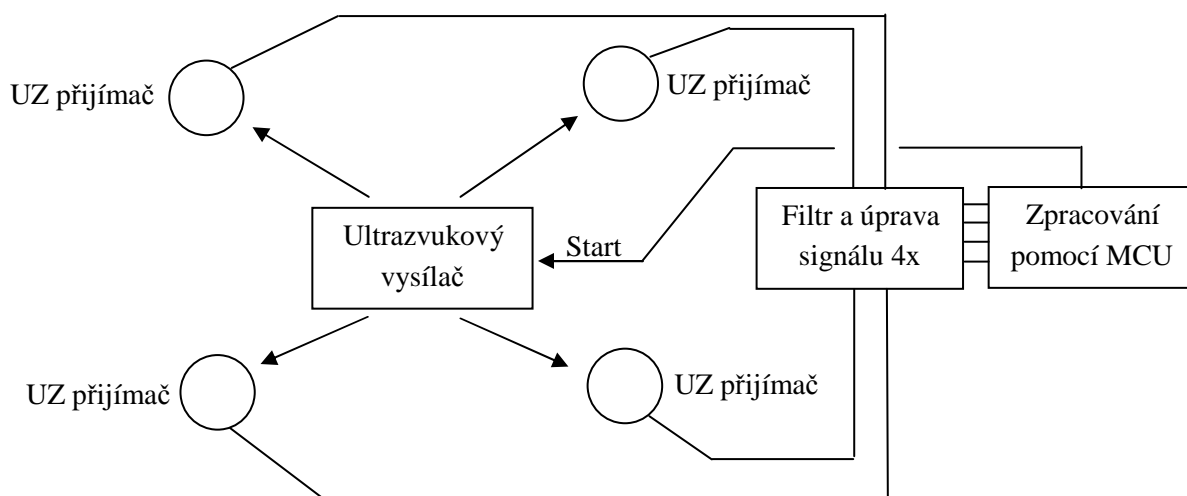
Pro praktickou část této práce je navrženo řešení vývojové verze zařízení, za účelem získání praktických zkušeností a poznatků pro případnou další verzi tohoto zařízení nebo pro jiné účely.

Jako zdroje ultrazvukového vysílače je navrženo zařízení, které lze umístit na mobilní objekt. Jelikož jde o aktivní systém, vysílá tento vysílač v definovaných intervalech hlavním řídicím mikrokontrolérem ultrazvukový, časově omezený ultrazvukový signál (značky). Tyto ultrazvukové značky pak zachycují vhodně rozmístěné ultrazvukové přijímače a následně je zpracovává hlavní řídicí mikrokontrolér. Pro zachycení pohybujícího se zdroje ultrazvuku (mobilního objektu) je použito čtyř ultrazvukových přijímačů k tomu, aby podle zaznamenaných ultrazvukových signálů, tedy jejich rozdílných dob přijetí vzhledem době vyslání, byl proveden výpočet polohy mobilního objektu. Tato poloha je uložena v proměnné (x, y) kartézského souřadnicového systému a odesílána na sériový port.

Pro zvolení výše uvedeného aktivního systému vedla faktická úvaha, že s pasivním systémem (mobilní objekt tedy jeho snímač poslouchá podobně jako GPS) se u akustického spektra nedá pracovat z důvodu nemožnosti snadné identifikace statických vysílacích ultrazvukových vysílačů. Modulace, jež by rozlišila jednotlivé signály, by zřejmě nutně zasáhla do slyšitelného spektra akustického signálu. Jedinou průchodnou metodou by u pasivního systému byla metoda postupného střídání vysílačů, což by příliš protahovalo doby cyklu jednoho měření a také by zřejmě muselo docházet k započítání korekce sejmutých hodnot signálu mezi první a poslední značkou vzhledem k pohybu objektu .

V celém systému jsou použity níže uvedené části s definovanými funkcemi a vlastnostmi:

- ✓ Ultrazvukový vysílač
 - Je programovatelný pomocí mikrokontroleru.
 - Vysílá ultrazvukové značky podle pokynu hlavního řídicího mikrokontroléru.
 - Tyto značky obsahují vždy přesný počet period k jednoznačnější identifikaci.
 - Je konstruován s ohledem na maximální mobilitu.
 - Vnitřní software umožňuje snadnou změnu chování ultrazvukového vysílače
- ✓ Ultrazvukový přijímač
 - Obsahuje vstupní filtr k omezení nežádoucí části kmitočtového spektra
 - Obsahovat elektronickou část upravující signál na hodnoty vhodné k digitálnímu zpracování.
 - Umožňuje snadné umístění do požadované polohy snímání
- ✓ Vyhodnocovací zařízení
 - Obsahuje mikrokontrolér pro snímání a zpracování naměřených dat.
 - Obsahuje vstupní obvody k zachycení upravených časových značek z ultrazvukových přijímačů.
 - Zpracování dat je prováděno v reálném čase.
 - Data jsou vypočtena a uložena ve formě vhodného souřadnicového systému.
 - Získaná data jsou poskytnuta k dalšímu zpracování.
 - Data jsou poskytnuta na sériový port standardního PC.
 - Ke konstrukci je využita hw vývojová deska z katedry měřící a řídicí techniky.
 - Vnitřní software umožňuje snadnou změnu programu a vývoj verzí sw
 - Řídí (vzdáleně) starty ultrazvukového vysílače



Obr.6.1. Schéma navrženého systému měření polohy.

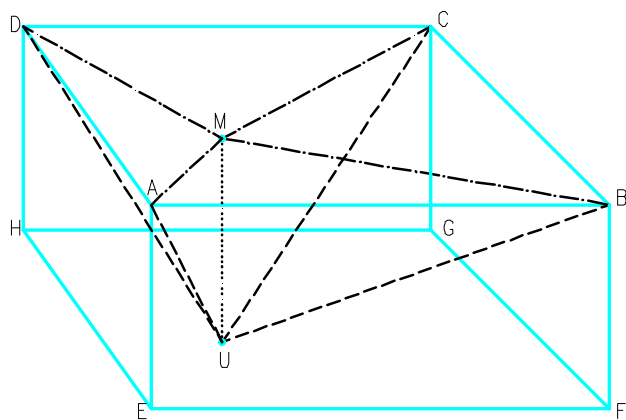
7 Rozbor návrhu systému

7.1 Předpoklady aplikačního použití

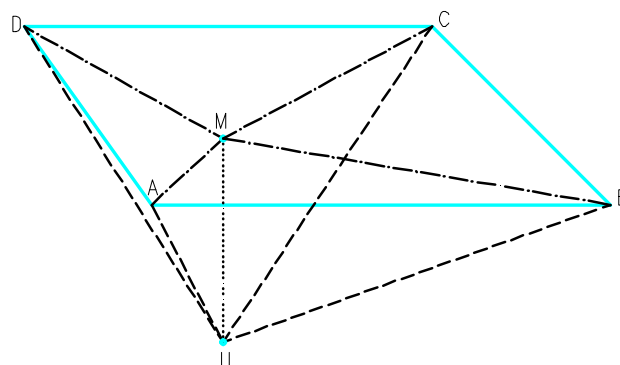
Návrh této aplikace vychází z rychlostí šíření akustického signálu v prostředí běžného vzduchu, který se vyskytuje okolo nás. Předpokládá se využití především v krytých prostorách, které jsou chráněné před atmosférickými vlivy. Tyto prostory jsou velmi často temperovány a proto je uvažována běžná pokojová teplota okolo 20°C, z čehož také vychází rychlost šíření akustického signálu 343 ms⁻¹. Pokud by byla uvažována jiná teplota, výpočtový algoritmus by musel být přiměřeně upraven.

Pro tuto aplikaci je použito ultrazvukového akustického signálu o frekvenci 40kHz. Vlastnosti tohoto ultrazvukového akustického signálu jsou velmi podobné akustickým signálům o vysokých slyšitelných frekvencích s tím, že jsou o něco více směrové a lépe odrazitelné od překážek, což vychází z kratší vlnové délky a s čím je nutné při návrhu prostorového modelu počítat.

Prostorově je model navržen tak, že 4ks ultrazvukových snímačů jsou umístěné do čtverce o známých rozměrech. Navržený model má z prostorových důvodů rozměr 100cm x 100cm a výška ultrazvukových snímačů je navržena na 25cm. Navržený model je míněn jako minimální možný, vzhledem k rozměrům ultrazvukového vysílače a přijímačů. Již při těchto rozměrech je i bez měření zřejmé, že se chyba bude pohybovat podle rozměrů vysílače jehož průměr je kolem 5cm. Tuto chybu nebude možné vždy korigovat v algoritmickém výpočtu, vzhledem k možným různorodým pohybům. V praxi by celý systém měl mít větší rozměry – spíše tak jednotky metrů až desítky metrů, kdy by se tyto chyby vzhledem k velikosti mobilního objektu mohly zanedbat.



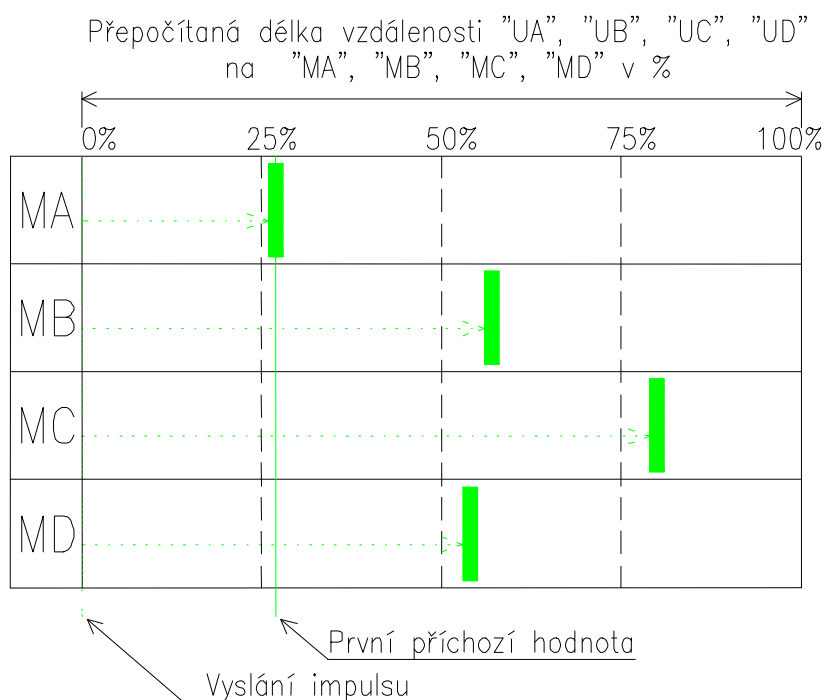
s vyznačenou rovinou nula EFGH



bez vyznačené roviny nula

Obr.7.1.1 Situační nákres prostorového řešení snímání polohy – více viz popis.

Na obrázku 7.1.1 je zobrazen prostorový nákres, kde je plnou čarou vyznačen prostor, ve kterém je prováděno snímání polohy mobilního objektu (v našem případě jde o prostor jehož základnou je čtverec). Označený bod „U“ je vlastní mobilní objekt s ultrazvukovým vysílačem, který je součástí roviny „EFGH“. V jednotlivých bodech roviny „ABCD“ jsou umístěny ultrazvukové snímače. Každý z těchto snímačů je s bodem „U“ vždy v přímce (čárkovaná čára), která je vždy stoupající, což je cesta ultrazvukového signálu k jednotlivým snímačům.



Obr.7.1.2 Vyznačení časově polohových dat – více viz popis.

Na obrázku obrázku 7.1.2 je znázorněn diagram vystihující časově v procentech nasnímané a přepočítané hodnoty z obrázku 7.1.1.

7.2 Použité metody výpočtu algoritmu

Je možné použít v zásadě dvě možnosti výpočtu algoritmu. Každý má určité výhody a nevýhody.

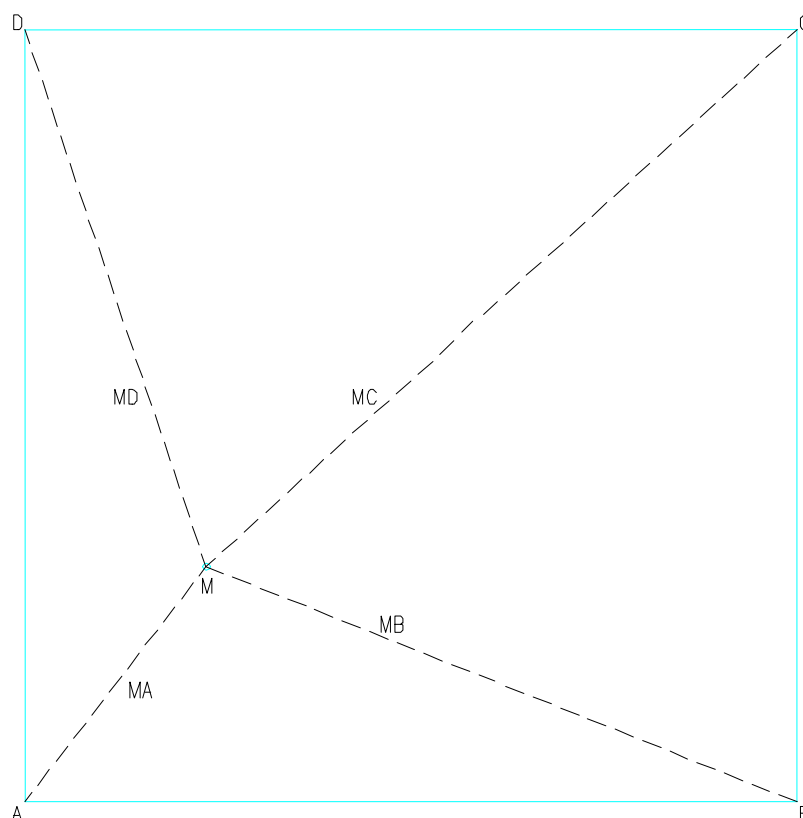
- ✓ Systém postupu podobný systému GPS
- ✓ Systém postupu výpočtu podle Pythagorovy věty v trojúhelnících

Systém postupu podobný systému GPS - využívá principu trilaterace vysvětleného v kapitole 3.2. Tento systém je pro náš účel zbytečně komplikovaný a potřebuje minimálně tři měření což snižuje počet upřesňujících výpočtů pouze o jedno čtvrté měření. Tato metoda je vhodná pro systémy GPS a jeho prostorové uspořádání satelitního charakteru.

Systém postupu výpočtu podle Pythagorovy věty – nejdříve přepočítá dráhu ultrazvuku „UA“ na „MA“, „UB“ na „MB“, „UC“ na „MC“ a „UD“ na „MD“ pomocí Pythagorovy věty a potom aplikuje stejné věty na poměry v trojúhelníku rozděleného jeho výškou na dva pravoúhlé trojúhelníky vždy pro dva sousední snímače. Tento postup byl zvolený pro algoritmus výpočtu, jelikož přináší pro tuto úlohu několik výhod, které budou popsány v následující kapitole.

7.3 Vyvinutý matematický algoritmus

Pro výpočtový algoritmus je zvolena metoda pomocí Pythagorovy věty a poměrů v trojúhelníku, která v podstatě pro nejzákladnější výpočet vystačí se dvěma měřeními. Zbývající dvě měření jsou použita buď, pro upřesňující či kontrolní výpočty nebo v případě ztráty některého z měření (mohou být ztraceny až dvě) je možné provést výpočet pouze se dvěma sousedními změřenými hodnotami a překlenout tak dobu nevhodného postavení vysílače vůči některým senzorům, či jeho akustické polohové zastínění.



Obr.7.3.1 Situační náčrtek roviny „ABCD“ s vyznačenými přepočítanými vzdálenostmi MA až MD více viz popis.

Nejprve se provedou případné korekce sejmutých hodnot o konstantní hodnoty startu systému a přepočet na délkové hodnoty (v mm nebo cm), poté jsou převedeny všechny čtyři změřené prostorové hodnoty časových údajů dráhy „UA“, „UB“, „UC“, „UD“, prostoru „ABCDEFGH“ na plošné hodnoty „MA“, „MB“, „MC“, „MD“, plochy „ABCD“ pomocí Pythagorovy věty.

Dále je výpočtový algoritmus rozdělen v první fázi na čtyři samostatné výpočty trojúhelníků „MAB“, „MBC“, „MCD“ a „MDA“. Výpočet je proveden pro „MAB“ pomocí Pythagorovy věty a poměrů v trojúhelníku, kde je nutné znát všechny tři strany a dopočítat výšku, což je vlastně jedna

souřadnice v kartézském systému souřadnic. Druhá souřadnice se vypočítá prostým dosazení první souřadnice do předchozí rovnice.

Takto vypočítané souřadnice již reprezentují polohu objektu, avšak s určitou chybou (budou popsány dále), proto se provede opakovaný výpočet souřadnic, tentokrát pro ostatní trojúhelníky „MBC“, „MCD“ a „MDA“. Jelikož všechny výpočty mají postupně posunutou přeponu trojúhelníku o 90° mají i souřadnice nekompatibilní počátky souřadnic. Výsledná čísla je nutné přepočítat na společný souřadnicový počátek, jež v našem případě reprezentuje první výpočet s trojúhelníkem „MAB“ a po té se provede jejich porovnání a v případě přípustné tolerance se provede jejich aritmetický průměr, čímž se v drtivé většině případů sníží odchylky od skutečnosti.

Matematický postup pro jeden výpočtový trojúhelník, například MAB:

$$MA = \sqrt{(UA)^2 - (MU)^2} \qquad MB = \sqrt{(UB)^2 - (MU)^2}$$

$$x = \frac{(AB)^2 + (MA)^2 - (MB)^2}{2 \cdot AB} \qquad y = \sqrt{(MA)^2 - x^2}$$

8 Technické řešení – návrh ultrazvukového vysílače

8.1 HW řešení

V této diplomové práci je použit ultrazvukový vysílač, který obsahuje 8bitový mikrokontrolér firmy Freescale typu MC9S08QG8CDNE v SMD provedení s 8 vývody. Jde o mikrokontrolér s níže uvedenými základními parametry.

CPU MC9S08QG8, 8-pin SMD

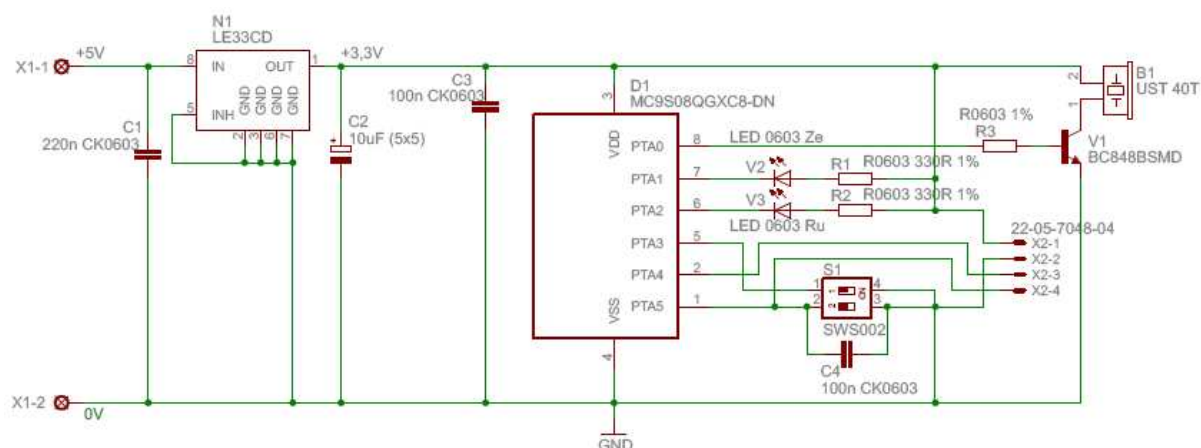
- ✓ 8kB Flash
- ✓ 512B RAM
- ✓ Interní 32kHz Oscilátor
- ✓ 4x GPIO, 1x Input Only, 1x Output Only
- ✓ Timer Interface Module
- ✓ IIC modul
- ✓ 1kanálový, 16bitový Timer
- ✓ 4 kanálový, 10bitový ADC
- ✓ Analogový komparátor

Pro požadované účely je tento mikrokontrolér více jak dostatečný. Přestože je pouze osmi vývodový má obsaženy všechny potřebné obvody k potřebám programovatelného ultrazvukového vysílače [7].

Pro ultrazvukový zářič je použit keramický ultrazvukový měnič (vysílač) typu UST 40T mající shodné vlastnosti jako 400ST160, který již sám o sobě vykazuje úzkopásmovou vyzařovací charakteristiku okolo 40kHz, při šířce pásma 2kHz pro -6dB.

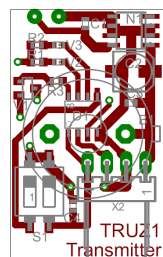
HW provedení je řešeno oboustranným spojem, ruční výroby (jde o vývojovou verzi). Řešení obsahuje některé pomocné součástky, jako led diody a tlačítka ke snadnějšímu odladění ultrazvukového vysílače. Zvolený MC obsahuje vnitřní oscilátor i všechny další potřebné obvody, které jsou potřebné k vytvoření flexibilního programu, produkujícího žádaný tvar signálu pro ultrazvukový přenos. Po odladění tohoto vysílače, je možné v druhé HW verzi vypustit některé již nepotřebné součástky.

Níže je uvedené použité schéma a obrazce spojů a součástí.

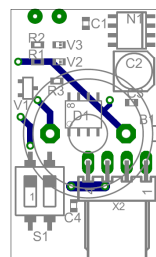


Obr. 8.1.1 Schéma vývovové verze ultrazvukového vysílače.

V levo ve schéma je stabilizátor napětí pro snížení napětí a jeho stabilizaci na úroveň 3,3V pro mikrokontrolér. Napájecí napětí na vstupu stabilizátoru nesmí překročit 18V a maximální odebíraný proud je 150mA. V pravo je použitý mikrokontrolér s periferními obvody a ultrazvukovým měničem. Pro potřeby programování a ladění sw je vybavena tahle verze vysílače programovacím konektorem X2 jehož zapojení je patrné ze schématu . Zkoušky si vyžádaly posílení vyzařovacího výkonu ultrazvuku a tedy změnu v zapojení, která je popsána níže.



Ze strany součástí – spoje Top



Ze strany součástek - spoje Bottom

Obr. 8.1.2 HW řešení vývovové verze desky M = 1 : 1.

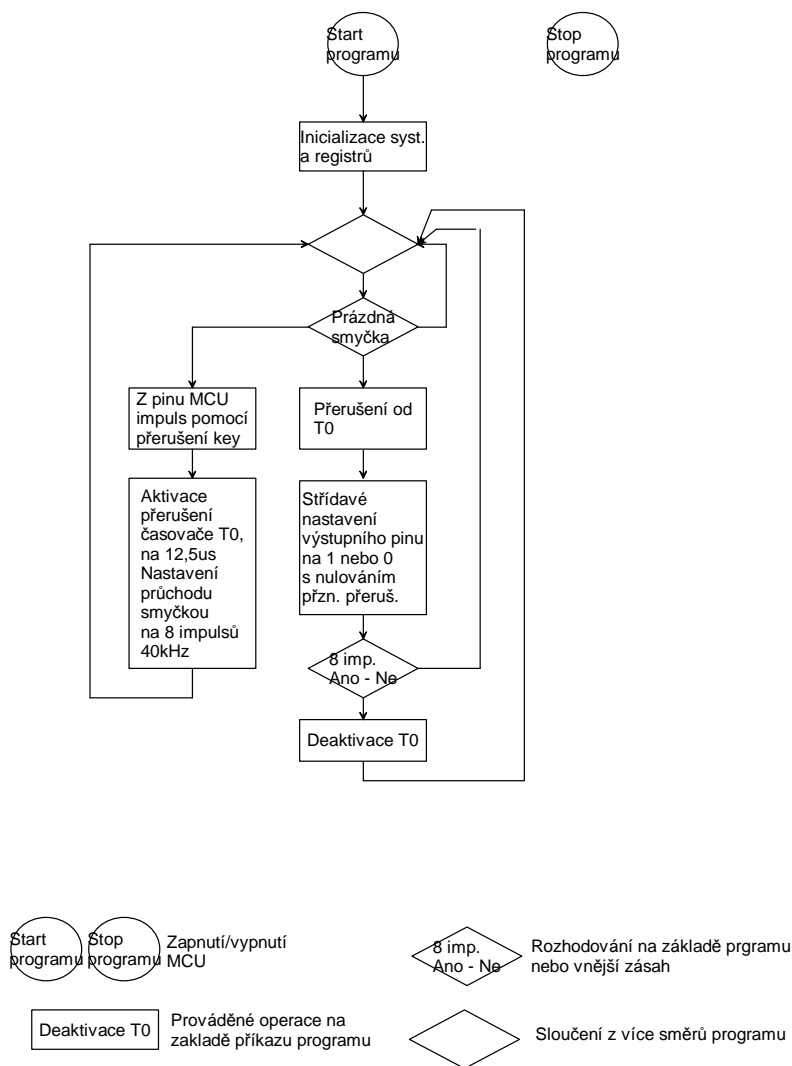
8.2 SW řešení

Pro chod navrženého mikrokontroléru je navržen flexibilní program, který umožní měnit všechny modulační parametry ultrazvukového signálu či signálové sekvence. Pro výstup z MC je

využito binárního výstupu. Jedině zesílení signálu se nastaví velikostí odporu R3 v zapojení tranzistoru T1 a tím tedy i hodnota amplitudy akustického signálu.

Pro vytvoření SW je použito vývojového prostředí firmy Freescale CodeWarrior Development Studio.

Základní verze vývojového diagramu pro sw mikrokontroléru vysílače



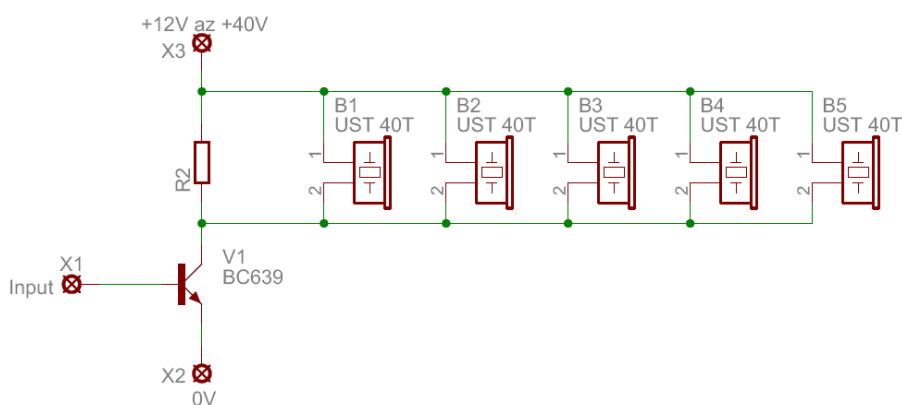
Obr. 8.2.1 Vývojový diagram sw vysílače MCU

Program pro mikrokontrolér, jež má poskytovat sérii pulsů, v tomto vývojovém stádiu, je v podstatě velmi jednoduchý. Po zapnutí napájecího napětí se inicializují registry a program začne běžet v prázdné smyčce do té doby, dokud nepřijde z řídicího mikrokontroléru přes vnější pin pomocí jeho přerušení pokyn ke startu časovače T0, který potom v periodických přerušeních co

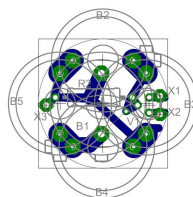
12,5us mění výstup vysílače pinu na 1 nebo 0 tak, že vznikne signál frekvenci 40kHz. To se děje po nastavený počet průchodů přerušením T0 a poté se T0 vypne. Mikrokontrolér pak dále běží v prázdné smyčce.

8.3 Výkonový modul ultrazvukového zářiče

Při zkouškách bylo zjištěno, že akustický výkon ultrazvukového signálu je nedostatečný a těžce směrovatelný do všech stran od vysílače i při použití rozptylového elementu nad zářičem. K tomu také bylo zjištěno, že ultrazvukové snímače mají mnohem nižší skutečnou citlivost, než mají uváděné v katalogových listech (více v části o snímačích). Proto bylo přistoupeno k doplnění tohoto vysílače o výkonovou elektroakustickou ultrazvukovou jednotku dle nákresu níže.



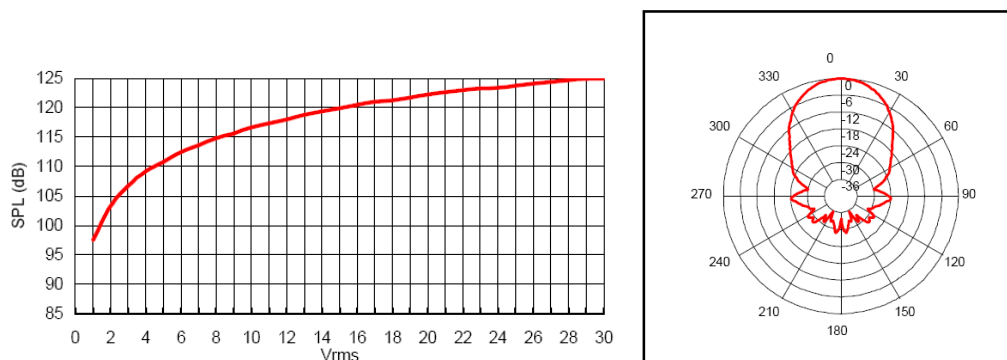
Obr. 8.3.1 Schéma vývojové verze doplněného výkonového stupně ultrazvukové jednotky.



Obr. 8.3.2 HW řešení vývojové verze desky ze strany součástek - spoje Bottom M = 1 : 1.

Na řídicí desce s procesorem vysílací jednotky byl zrušen smd tranzistor s ultrazvukovým měničem (je přesunut na výkonovou ultrazvukovou jednotku), odpor R3 do báze byl nahrazen hodnotou 3kΩ, aby byl pokryt proudový odběr odporu R2 a ultrazvukových měničů B1 až B5 z kolektoru tranzistoru V1. Výstup z R3 na desce ultrazvukového vysílače byl propojen s V1 na výkonovém vysílači a také byly propojeny potenciály 0V. Jelikož se ukázalo původní napájecí napětí (3.3V) pro ultrazvukový budič nedostatečné, bylo toto napětí podstatně zvýšeno a odděleno od napájecího napětí mikrokontroléru (vyžadovala to také malá citlivost snímačů - více v části o snímačích). Při původním řízení ultrazvukových měničů dle obr. 8.1.1 bylo na měničích řídicí napětí maximálně 2V, což umožňovalo dosah na snímač kolem 20cm. Napětí bylo nutno zvětšit na hodnotu kolem 5V, což odpovídá napájecímu napětí 15V. Při takto vysokém napájecím napětí se

mohla teprve prodloužit vzdálenost vysílač–přijímač z původních 20cm až na 1,5m, což bylo pro náš případ dostatečné. Napětí na ultrazvukovém měniči kolem 5V znamená podle katalogových listů SPL kolem 112dB. Pro ještě větší vzdálenosti je možné na ultrazvukový měnič připojit napětí, podle katalogových listů až 20V, což by odpovídalo napájecímu napětí řadově přes 40V. Použitý řídicí tranzistor je dimenzovaný na maximální $U_{ce} = 80V$, což umožňuje využít i tuto hodnotu řídicího napětí ultrazvukového měniče. Tady je však asi lépe zkonstruovat budič ultrazvukového měniče tak, aby poskytoval vyšší účinnost, což také potvrdily zkoušky s výše popsáním buzením měniče.



Obr. 8.3.3 Závislost SPL na napájecím napětí měniče a směrová charakteristika uz zářiče [10].
(SPL - hladina akustického tlaku)

Pro vyzařování je nyní použito celkem pět ultrazvukových měničů, z toho čtyři natočené v rovině „EFGH“ po 90° se sklonem od této roviny kolem 30°, což pokryje celý vnitřní prostor našeho čtverce 1m x 1m tak, aby se v každé poloze mohly nasnímat hodnoty pro výpočet polohy, tedy minimálně alespoň ode dvou snímačů. Pátý snímač je orientován nahoru (kolmo na rovinu „EFGH“) tak, abychom alespoň z části posílili vyzařování ultrazvukových impulsů v případech pohybu mobilního objektu pod snímači. Přesnost by se v podstatě ještě zvýšila, pokud by se vysílač vybavil tak, aby celá horní polokoule od roviny „EFGH“ byla pokryta plynule vyzařujícím ultrazvukovým signálem. To je po obvodu alespoň 7-mi ultrazvukovými měniči a směrem nahoru v rovnostranném trojúhelníku 3-mi měniči, což je celkem hodně vzhledem k ploše, kterou by měl ultrazvukem obsloužit. Jiným řešením by bylo odejmout z ultrazvukových měničů ochranný obal, který usměrňuje akustické vlnění, tím se měnič zmenší a jeho plošné vyzařování zvětší (tohle ovšem nebylo zkoušeno) nebo použít jiných vhodnějších měničů či měničů vlastní konstrukční výroby, což je zřejmě mimo možnosti této diplomové práce.

9 Technické řešení – návrh ultrazvukového přijímače

Vstupní částí ultrazvukového signálu je ultrazvukový přijímač, který snímá ultrazvukový signál, filtruje jej a upravuje na tvar vhodný k snímání definovaným vstupem mikrokontroléru.

9.1 HW řešení

Pro ultrazvukový přijímač je použit keramický ultrazvukový měnič typu UST 40R mající shodné vlastnosti jako typ 400SR160, který již sám o sobě vykazuje úzkopásmovou snímací charakteristiku okolo 40kHz, při šířce pásma 2,5kHz pro -6dB.

Jako vstupní část z ultrazvukového přijímače je použita pásmová propust 2.řádu, která omezí frekvenční signály a případné rušení s útlumem 40db/dek. po obou stranách 40kHz pásma. Tento filtr je konstruován jako aktivní se dvěma operačními zesilovači (vždy 1.řád dolní a 1.řád horní propusti na jeden OZ), za kterým jsou zapojeny další dva OZ, jež zesilují signál na hodnoty potřebné ke spouštění zachycovacího (capture) obvodu v mikrokontroléru. Pro omezení velikosti signálu na hodnotu vhodnou pro vstup mikrokontroléru je využito limitace OZ. Signál je přiveden na vstup prvního OZ s filtrem PP 1.ř, kde je nastaveno zesílení pevně na hodnotu mezi 1 – 2. Na druhém OZ s filtrem PP 1.ř je zesílení nastavené odporovým trimrem na maximální hodnotu tak, aby s dostatečnou rezervou nemohlo dojít k rozkmitání OZ i při velkých hodnotách vstupního signálu předchozího stupně OZ. Třetí a čtvrtý stupeň s OZ jsou zařazeny vždy za sebou za účelem prostého zesílení signálu a jsou nastavené odporovým trimrem vždy na maximální hodnotu zesílení tak, aby s dostatečnou rezervou také nemohlo dojít k rozkmitání. Této kaskády je tedy využito k tomu aby první dva stupně sloužily jako PP filtry bez limitace signálu a druhé dva stupně zesilovaly maximálně signál a záměrně docházelo alespoň na posledním stupni k limitaci výstupního signálu, čím se zajistí potřebné velikosti vstupního napětí pro digitální vstup mikrokontroléru. Napájecí napětí pro OZ je navrženo tak, aby výstupní napětí z OZ nebylo větší než povolené napětí vstupu MCU. V našem případě ve napájecí napětí 6V a k limitaci dochází kolem 4,5V. Maximální hodnota, která nesmí být překročena pro použité MCU je 6,5V. Napětí po připojení na zachycovací vstup MCU o nějakou hodnotu ještě poklesne. Měřením se ukázalo, že tato hodnota je na necelých 3V. Celý ultrazvukový přijímač pracuje tak, že pokud přijde na něj nějaký signál z ultrazvukového vysílače dojde k limitaci čtvrtého nebo čtvrtého i třetího OZ. Pokud na něj dojde signál slabší než hodnota citlivosti snímacího měniče na výstupu se neobjeví žádný signál. Tím je definována log. 0 a log. 1 pro MCU. Tento systém snímání se ukázal jako velmi spolehlivý.

Výpočet hodnot filtru PP je uveden níže, kde jsou také uvedeny zvolené typy OZ.

Pro uvedený typ filtru (jeden stupeň PP) definujeme:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \quad \text{a} \quad C_1 = C_2 = C$$

$$\text{Potom } \omega_p = \frac{\sqrt{2}}{RC}, \quad \frac{1}{\alpha} = Q_p = \frac{\sqrt{2}}{4 - K}, \quad H_0 = \frac{K}{4 - K}$$

Definujeme Q_p a ω_p a vypočítáme $RC = \frac{\sqrt{2}}{\omega_p}$ a $K = 4 - \frac{\sqrt{2}}{Q_p}$

Pak zvolíme hodnotu C , dostaneme $R = \frac{\sqrt{2}}{C \cdot \omega_p}$

Vlastní výpočet:

Definujeme potřebné parametry PP: $Q_p = 10$, $f_0 = 40\text{kHz}$

Zvolíme:

$$C = 2.2\text{nF} = 0,000\,000\,002\,2\text{ F}$$

Vypočteme:

$$R = \frac{\sqrt{2}}{C \cdot \omega_p} = \frac{\sqrt{2}}{0,000\,000\,002\,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 40\,000} = 2\,559\,\Omega$$

$$K = 4 - \frac{\sqrt{2}}{Q_p} = 4 - \frac{\sqrt{2}}{10} = 3,85858$$

$$\text{Jelikož se } K = 1 + \frac{R_4}{R_5} = 3,85858$$

$$\text{tak lze určit } \frac{R_4}{R_5} = 2,85858$$

Definujeme $R_5 = 8,2\text{k}\Omega$

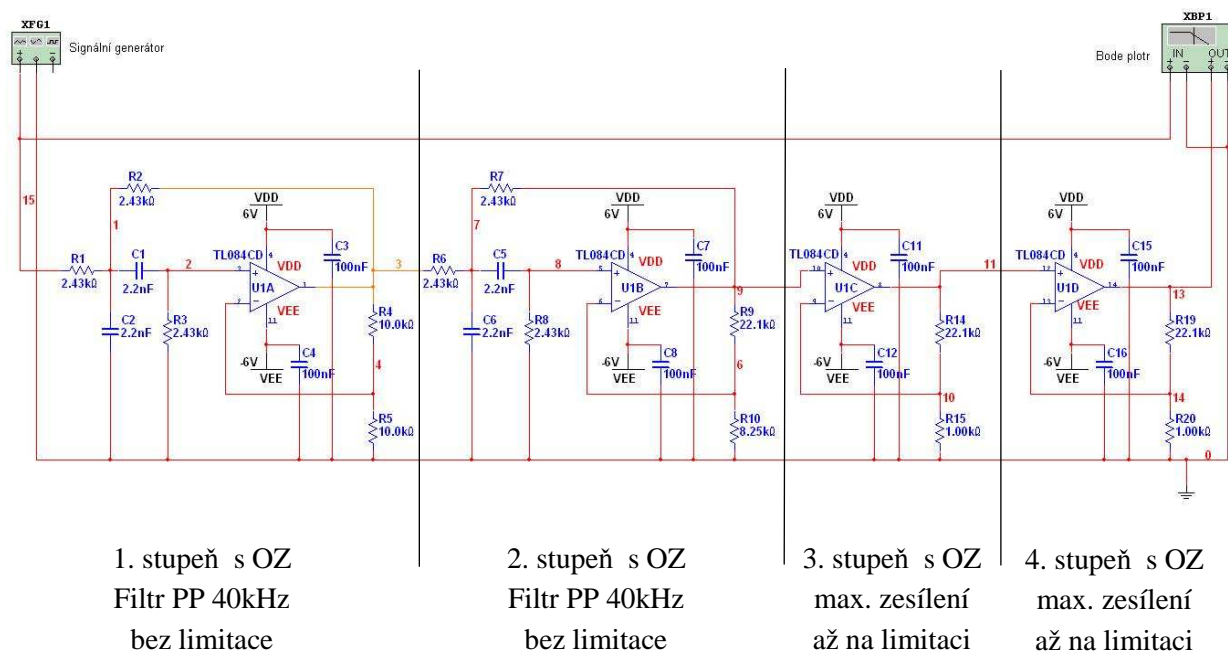
pak $R_4 = 23\,440\Omega$ zvolíme $22\text{ k}\Omega$.

Z praktických důvodů je použit pro nastavení druhého stupně odporový trimr o hodnotě $22\text{k}\Omega$. U prvního stupně bylo zesílení z důvodů stability sníženo na hodnotu uvedenou v popisu výše a po nastavení odporový trimr nahrazen pevnými odpory.

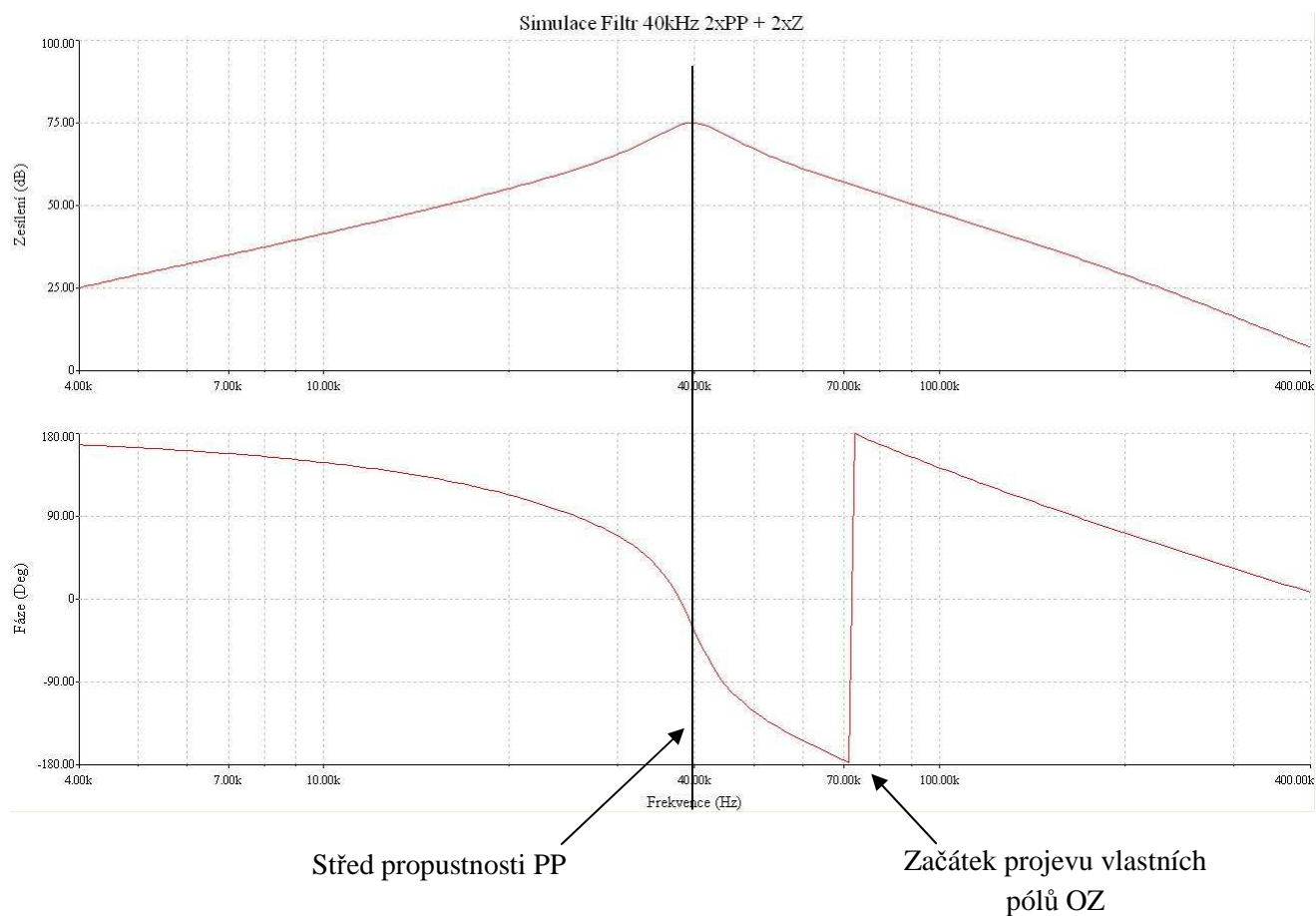
Pro realizaci byl vybrán běžný OZ typ TL084CD se čtyřmi OZ v jednom pouzdře, který pro frekvenční pásmo 40kHz dostatečně vyhovuje.

Uvedené zapojení s kaskádním řazením dvou filtrů s OZ za sebou, vede ke strmosti pásmové propusti od frekvence středu 40kHz na obě strany s útlumem -40dB/dek. a fáze od $+180^\circ$ přes 0 (maximum propustnosti signálu při 40kHz) do -180° .

Ještě před samou stavbou přijímače simulace prokázala vypočtené hodnoty.

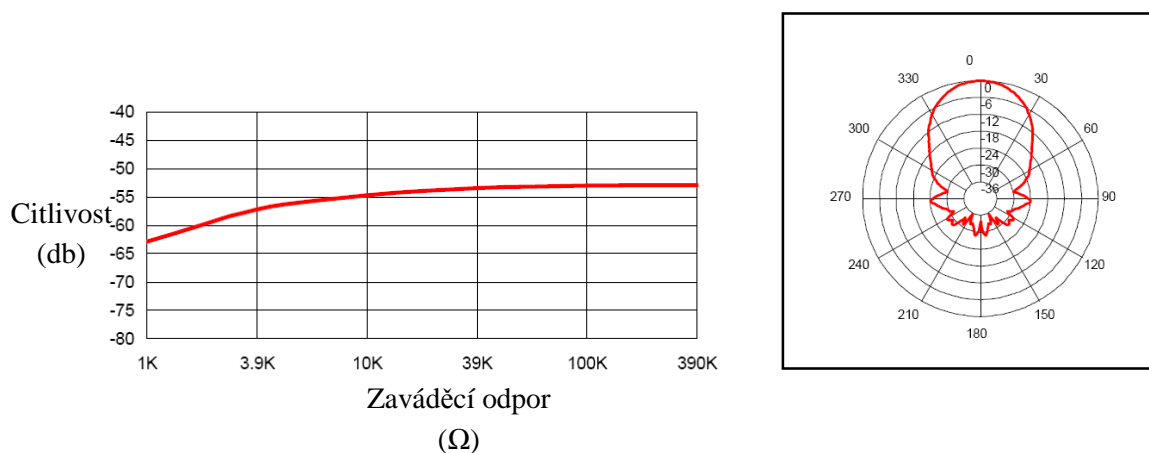


Obr. 9.1.1 Simulační schéma filtru a zesilovače signálu.

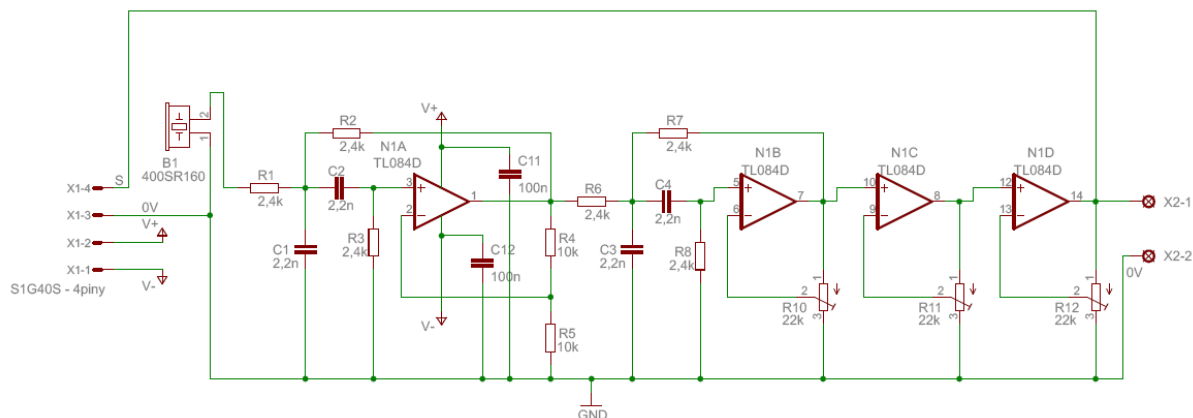


Obr. 9.1.2 Amplitudová a fázová charakteristika navrženého filtru se strmostí -40dB/dek ze simulace.

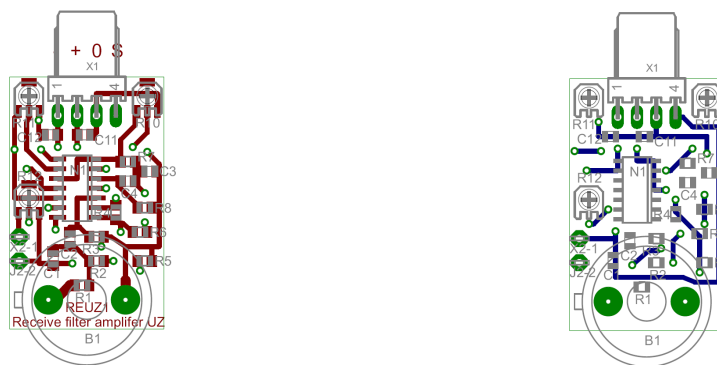
U fázové charakteristiky se i u simulace začínají projevovat kolem 71kHz vlastní póly OZ, což je nad uvedenou frekvencí v grafu vykresleno dalším vytočením fáze o více jak -180° a strmějším sklonem amplitudové charakteristiky. Na procházející signál na frekvenci 40kHz to ovšem nemá vliv a vyšší kmitočty od 40kHz jsou stejně nežádoucí.



Obr. 8.1.3 Závislost citlivosti na zevedeném odporu (Loaded Resistor) a směrová charakteristika uz snímače [10].



Obr. 9.1.4 Schéma snímače v Eagle, obvod bude obsažen 4x.



Ze strany součástek – spoje Top

Ze strany součástek - spoje Bottom

Obr. 9.1.5 HW řešení vývovové verze desky snímače M = 1 : 1.

Hotová deska ultrazvukového přijímače je osazena na kovový stojánek tak, aby šla velmi snadno nastavit jak výška, tak naklonění snímače do správného úhlu.

10 Technické řešení – vyhodnocovací zařízení

Dalším stupněm zpracování signálu je vyhodnocovací mikrokontrolér včetně jeho zapojení a použití software pro algoritmus výpočtu a vyhodnocení výstupních souřadnic polohy.

10.1 HW řešení

Vlastní nasnímání délky dráhy (časů) ultrazvukových značek (signálu) je provedeno šestnácti bitovým mikrokontrolérem firmy Freescale MC9S12E128. Pro hardwarové zachytávání uběhlého času je použito vstupního modulu capture (zachycení), který pomocí přerušení uloží právě aktuální hodnotu běžícího čítače do pomocného zachytávacího registru spouštěcí hranou signálu na vstupu.

Pro tuto diplomovou práci je použita hotová vývojová deka Adapt9S12E128 od firmy Technological Arts, která právě obsahuje uvedený typ mikrokontroléru. Výhodou této desky je, že umožňuje využívat všechny periferní vývody pomocí dvou 50-pinových konektorů umístěných na dvou stranách této desky jako modulové rozšíření. K této základní desce s mikrokontrolérem je k dostání velké množství testovacích a rozšiřujících desek s různým komponentním vybavením, které právě mohou využívat všechny vnitřní moduly uvedeného mikrokontroléru. Této nesporné výhody bylo využito ke konstrukci rozšiřující vývojové desky, která by napájela všechny snímače a zároveň přes společné konektory snímačů posílala nasnímané signálové značky do řídicí desky s mikrokontrolérem na příslušné vstupy. Na uvedené desce je také konektor pro dočasné napojení vývojové verze vysílače (nyní se předpokládá, že další verze zařízení by napojení řešila jiným bezdrátovým způsobem). Deska obsahuje také pomocné signalizační led diody, které mají pomoci při odlaďování této verze software.

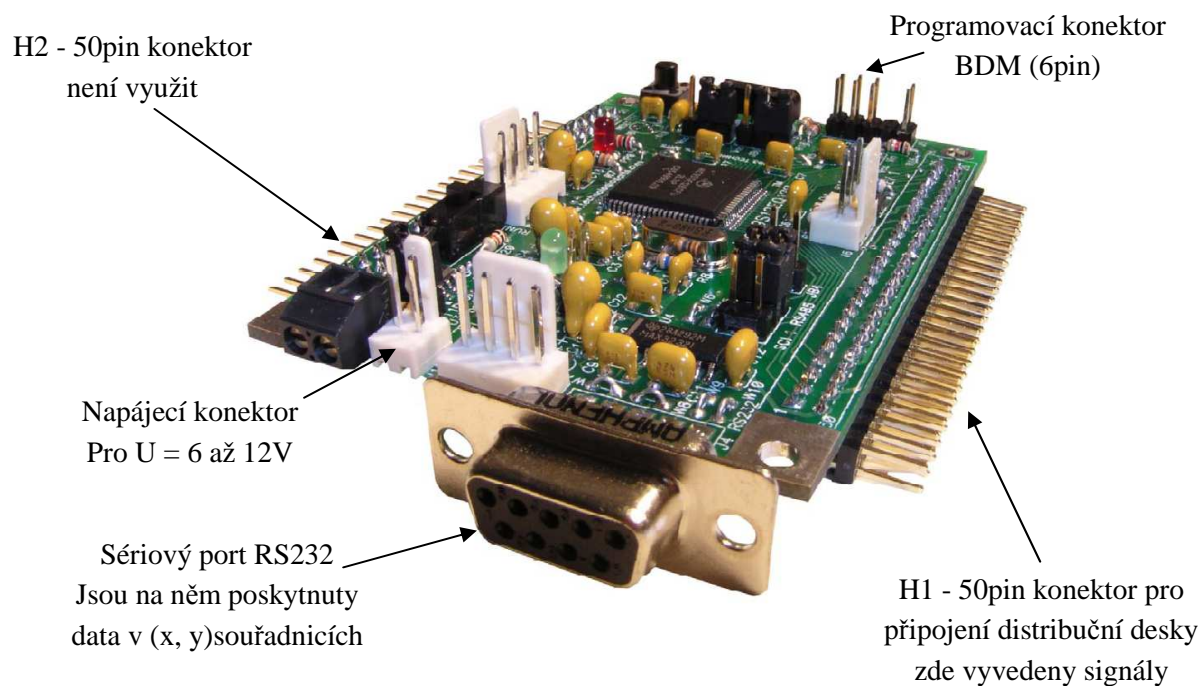
Stručná charakteristika použitého mikrokontroléru je uvedena níže. Jelikož jde o velmi bohatě vybavený MCU nebudeme zde uvádět podrobnější specifikaci [...].

MC9S12E128, 112-pin SMD

- ✓ 16-bit HCS12 CORE
- ✓ Řada HCS12 CPU
- ✓ 32K, 64K or 128K Byte Flash EEPROM
- ✓ 2K, 4K or 8K Byte RAM
- ✓ Dva 1-kanálové Digital-Analogový převodník (DAC) s 8-bit rozlišením
- ✓ Analogově-Digitální převodník (ADC) se 16-kanálovým modulem s 10-bit rozlišením s možností vnějšího spouštění
- ✓ Tři 4-kanálové časovače (TIM)
- ✓ 6 PWM kanálů (PWM)
- ✓ 6-kanálový pulsně šířkový modulátor s chybovou ochranou (PMF)

- ✓ Sériové komunikační rozhraní – SCI, SPI, IIC
- ✓ Hodinový a resetovací generátor
- ✓ Pracovní frekvence až 50MHz odpovídající 25MHz rychlosti sběrnice
- ✓ Vnitřní 2.5V regulátor
- ✓ Rozsah vstupního napětí 3.135V to 5.5V

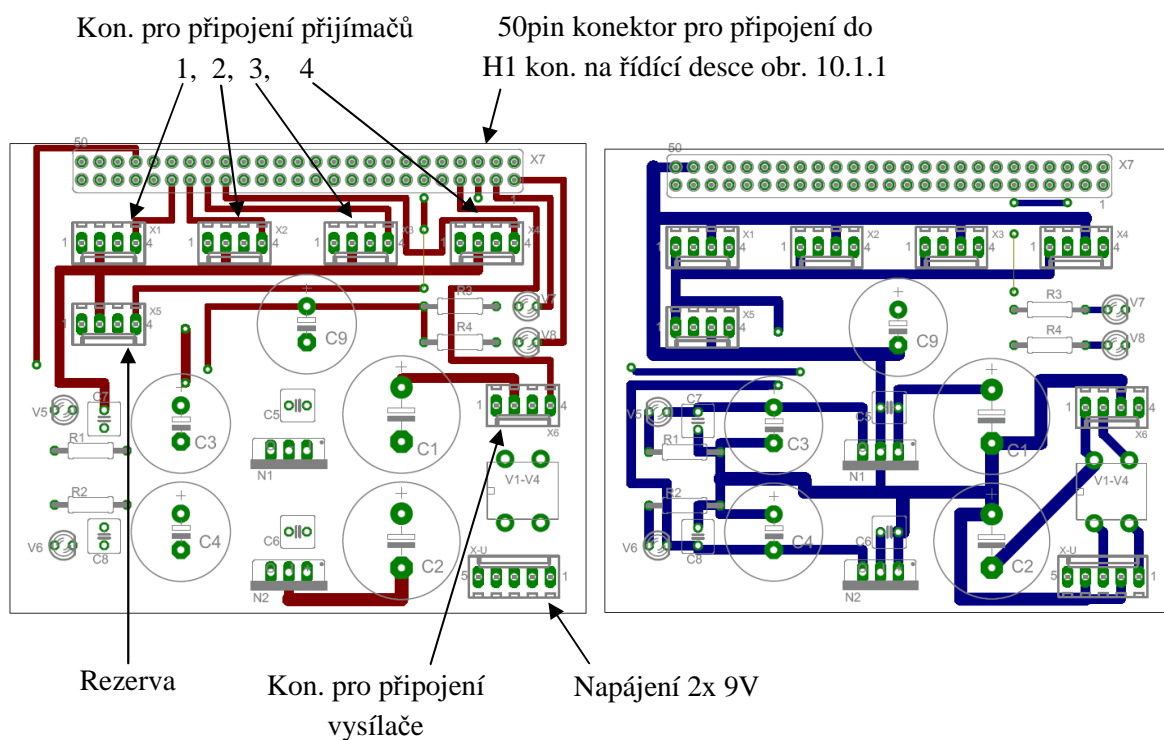
[\[8\]](#)



Obr. 10.1.1 Vývojová deska Adapt9S12E128 s MCU MC9S12E128 (schéma je uvedeno v příloze)

[\[9\]](#).

Distribuční deska je napájena z transformátoru s převodem 230V~/2x 9V~ 8VA, který není součástí této desky, přes vstupní konektor. Napětí je usměrněno a stabilizováno na 6V= pro napájení OZ snímačů. Přítomnost napájecího napětí je signalizována led diodami. Pro napojení snímačů je použito čtyř pinových konektorů, kde je vyveden i řídicí signál do MCU. Je zde také vyveden pátý konektor se stejným napájecím napětím, který má sloužit pro budoucí napojení dalších částí zařízení ukážouli se potřebné. Pro potřeby visílače je zde zřízen také konektor, ovšem bez stabilizace napětí, které je jen filtrováno a které nesmí z důvodu stabilizátoru pro MCU vysílače být větší než 18V=. Přes tento konektor je veden také řídicí signál ke spoštění pulzu vysílače ultrazvukového signálu. Konektor pro napojení na řídicí desku ADAPT je označen jako X7. Zde bych chtěl upozornit, že uvedené číslování ve schématu tohoto konektoru X7 neodpovídá číslování pinů na řídicí desce.



Obr. 10.1.3 Schéma vývojové distribuční desky v Eagle.

Vývojová distribuční deska s výše zobrazeným konektorem X7 se propojí s řídicí deskou s MCU na konektor H1 a tvoří tak jeden celek.

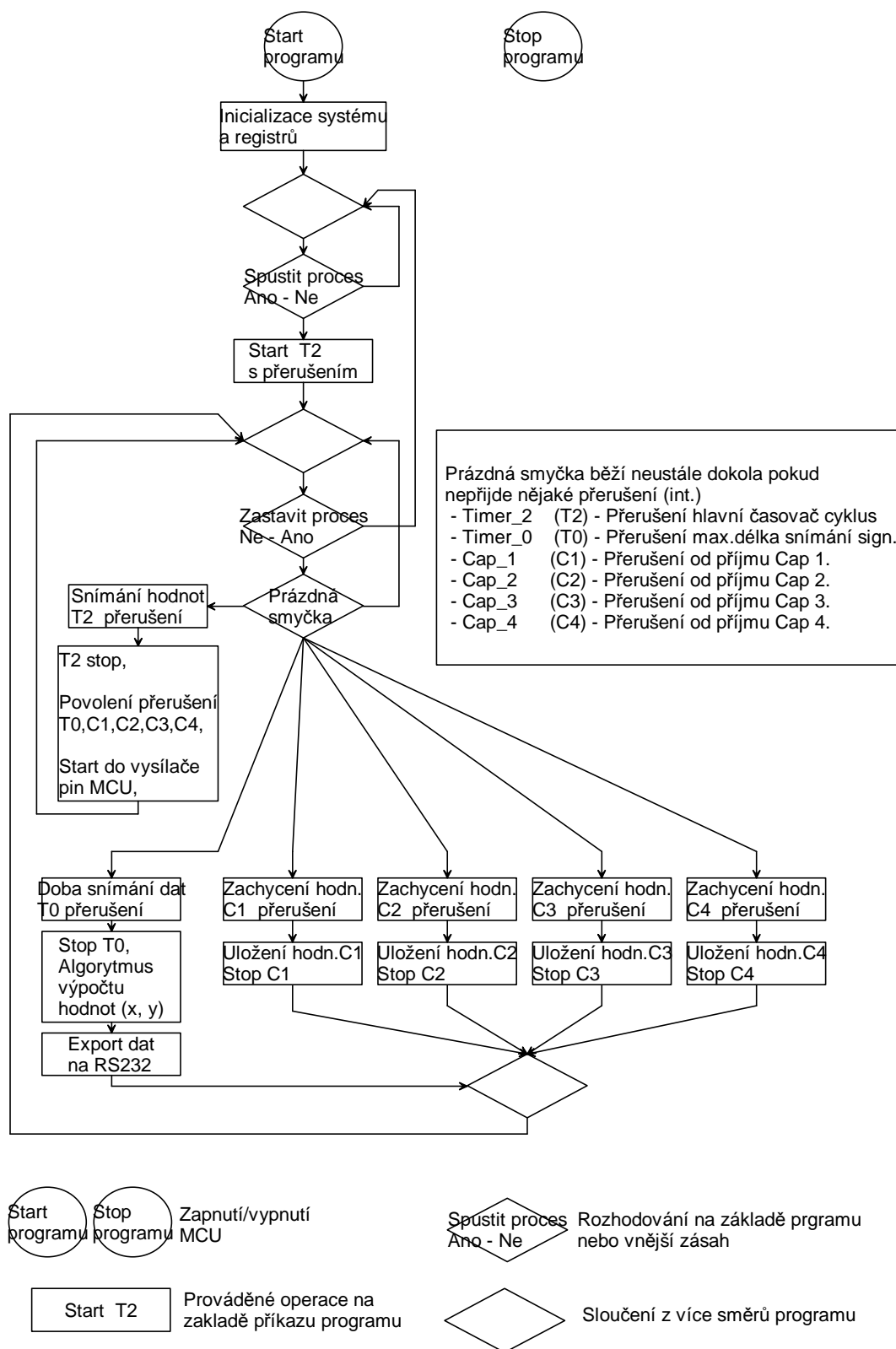
10.2 SW řešení

Pro chod mikrokontroléru je navržen program, který umožňuje provést celý proces snímání dat ze zachytávacího rozhraní MCU, provést jeho přepočet na délkové jednotky, testy platnosti a algoritmus výpočtu. Potom výsledné hodnoty překonvertovat do ascii znaků a odeslat prostřednictvím protokolu na sériový port RS232.

Pro vytvoření SW je použito vývojového prostředí firmy Freescale CodeWarrior Development Studio.

Níže je uvedený zjednodušený vývojový diagram celého procesu:

Základní verze vývojového diagramu pro sw řídicího mikrokontroléru



Obr. 10.2.1 Vývojový diagram sw řídicího MCU

V této verzi software je vzhledem k času, který při kombinovaném studiu mám, naprogramovaná pouze základní obslužná verze software. Je v něm provedeno cyklické spouštění měření od časovače T2. Jakmile je spuštěn MCU a přijde přerušení od T2 provede se vypnutí T2 a jsou aktivovány zachytávací moduly Cap-1, Cap-2, Cap-3 a Cap-4 na časovači T1 a také časovač T0. Čas k přerušení T0 je definován tak, aby mohl přijít na zachytávací moduly Cap i ten nejvzdálenější signál i s dostatečnou rezervou, protože jeho úkolem je ukončit zachytávání i v případě když nepříjde žádný signál, což znamená že vysílač je zastíněný nebo že není v provozu. Tím je ošetřeno, že program nezůstane tzv. viset ve slepé smyčce. Když nastane přerušení od zachycení jednotlivých Cap-X, tak se hodnoty uloží do paměti a deaktivuje se příslušný modul Cap-X. aby nedocházelo k opětovnému spouštění. Po příchodu přerušení od T0 se T0 deaktivuje a provedou se korekce hodnot o tzv. mrtvé doby před spuštěním signálu, hodnoty se pak přepočtou do délkových jednotek na cm a provede se algoritmický výpočet hodnot souřadnic (x, y). Jeho hodnoty s příslušnými informacemi z kolika měřících snímačů byl vypočítán se přeloží do ASCII znaků a odešle na RS232 k možnému dalšímu zpracování. Nastavení časovacích intervalů a dalších parametrů je dostupné zatím jen z vývojového rozhraní Code Wrrior.

10.3 Výstupní protokol

Pro komunikaci se sériovým portem RS232 byl zvolený níže uvedený protokol v ASCII znacích. Komunikace v této verzi software je zatím jen jednosměrná, ale je počítáno, že v některé z dalších verzí se doplní i o druhý směr, aby bylo možné parametrizovat a řídit celý proces z PC.

Pořadí byte paketu dat	Příklad hodnot bytů v ASCII	Popis
1-2	# "	Dva startovací znaky vždy stejné
3	0	4 spodní byte udávají která dvojice přijímačů (výpočtový trojúhelník) se podíleli na výpočtu, 0000xxx1 – MAB, 0000xx1x – MBC, 0000x1xx – MCD, 0000 1xxx – MDA, Bit 0-3 --- vždy 0 - nepodílí na výpočtu, 1 – podílí se na výpočtu Bit 4-7 --- vždy 0
4 - 6	rrr	Rezervované bity pro zvláštní účely , nyní vždy „rrr“
7	x	Vždy „x“ označení osy jejíž hodnoty budou v následujících 5-ti znacích přicházet
8-12	00075	Hodnota souřadnicové osy x – zde 75 cm, v případě málo nasnímaných hodnot vysílá text „ERROR“
13	y	Vždy „y“ označení osy jejíž hodnoty budou v následujících 5-ti znacích přicházet
14-18	00045	Hodnota souřadnicové osy y – zde 45 cm, v případě málo nasnímaných hodnot vysílá text „ERROR“
19-20	" #	Dva startovací znaky vždy stejné

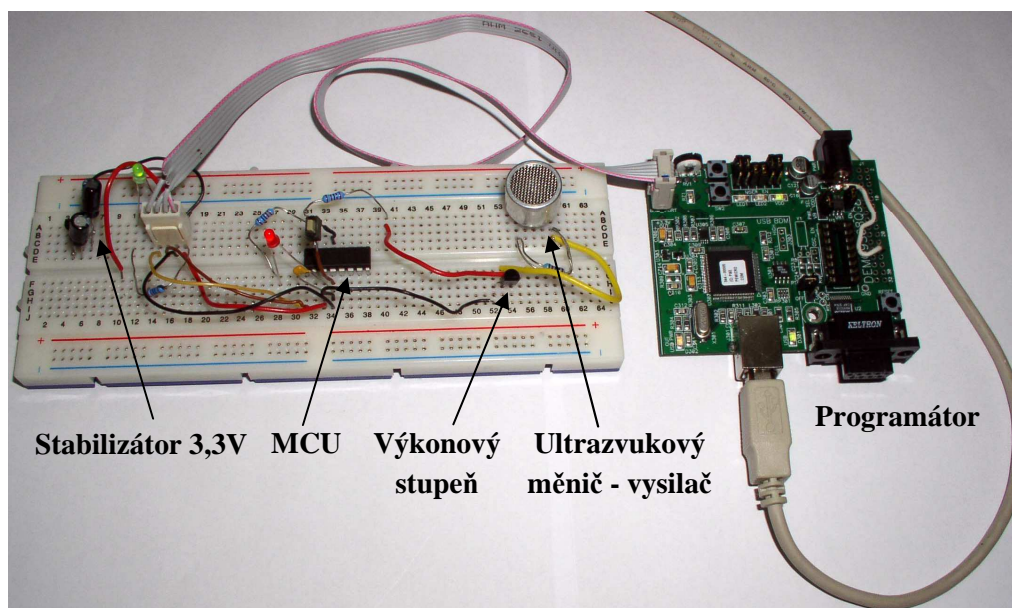
Obr. 10.3.1 Tabulka s protokolem v ASCII znacích pro odesílání na RS232.

11 Technické řešení – zkušební verze

Nejzákladnější část celého zařízení byla nejdříve sestavena v tzv. single verzi, to je jeden vysílač – jeden přijímač na kontaktním nepájivém poli, kde se mělo nejprve získat přesnější zapojení a alespoň hodnoty většiny součástek. Jedním z hlavních účelů bylo zjistit jak se budou chovat ultrazvukové vysílací a přijímací měniče.

11.1 Vysílač na kontaktním poli

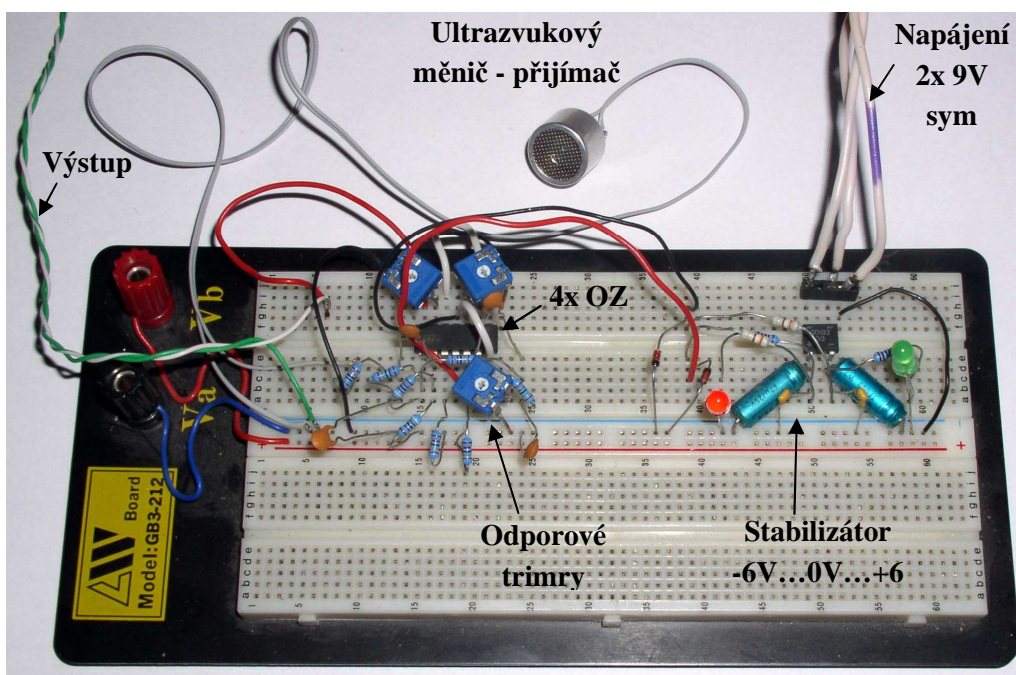
Na jednom kontaktním poli byl sestaven vysílač s MCU ve standardním DIP provedení se stejným procesorem, ale se 16 vývody, který obsahuje naprosto stejné jádro, ale s portem B na dalších 8 pinech. Na výstup jednoho pinu byl připojen přes omezovací odpor ultrazvukový měnič – vysílač UST40T. Byl napsán program, který trvale generuje signál o frekvenci 40kHz. Souběžně s tímto zkušebním vzorkem na kontaktním poli se už pracovalo na oboustranné první verzi plošného spoje pro MCU vysílače.



Obr. 11.1.1 Kontaktní pole s provizorním zapojením MCU jako vysílače.

11.2 Přijímač na kontaktním poli

Na druhém kontaktním poli byl sestaven přijímač se stejnojmenným TL084 se čtyřmi vnitřními OZ, avšak v DIP provedení se 14 vývody. Dva první OZ byli použity jako PP a dva druhé jako čisté zesilovače. Všechny čtyři OZ byly zapojeny s odporovými trimry pro možnost nastavení zesílení. Na vstup prvního OZ byl zapojen ultrazvukový měnič – přijímač UST40R.



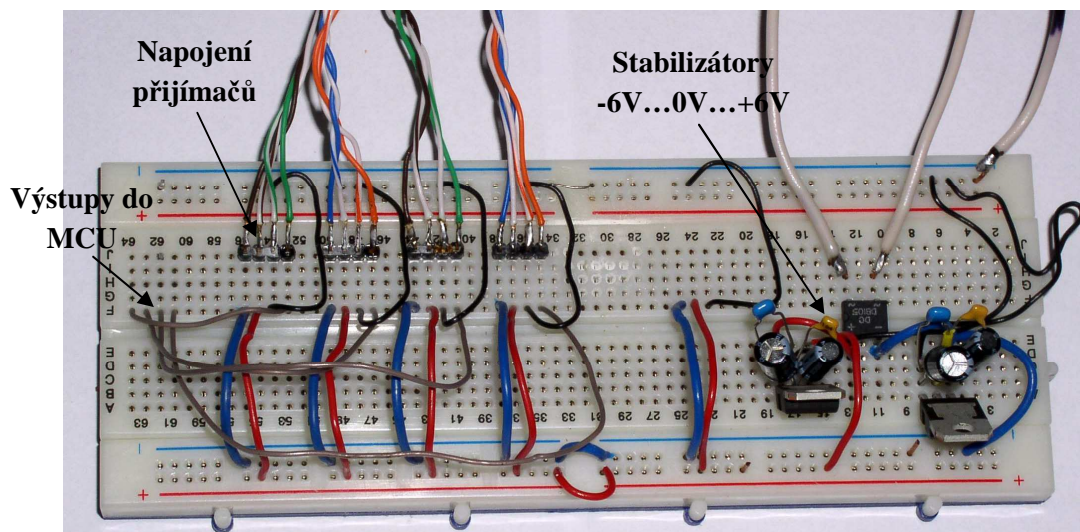
Obr. 10.2.1 Kontaktní pole s provizorním zapojením přijímače.

Při zkouškách bylo zjištěno, že vysílač fakticky bude potřebovat vyšší napětí než pouhých 3V a navíc bude muset být doplněn o více vyzařovacích elementů ultrazvuku. Jedním z hlavních důvodů posílení byl zjištěný fakt, že přijímací měnič při postupném zvětšování vzdálenosti od vysílače začal kolem 70 mV ztrácet impulsy a tím i jejich napětí se o to intenzivněji snižovalo. Podobně se chovaly všechny další UST40R přijímače ultrazvuku. Přitom výrobce v katalogových listech uvádí citlivost 5mV, s čímž bylo v postatě při prvotním návrhu počítáno. Výsledkem tedy bylo, že se musí razantně zvýšit vyzařovaný výkon měničů ultrazvuku a to do všech stran.

Poté byly postaveny vysílače a přijímače na deskách plošného spoje. Přijímač dokonce doznal druhé verze na plošném spoji, vzhledem nemožnosti nastavit na použitých plastových potenciometrech žádoucí zesílení (bez zásahu se zesilovač rozkmital díky nestabilitě odporového trimru). Bylo tedy v druhé plošné verzi použito cementových odporových trimrů, u kterých pro změnu zase nejde nastavit úplná nula na jezdcí vytočením na konec dráhy, ale to už byl menší problém, protože některé stupně zase nešly rozkmitat, což v praxi zase není na závadu.

11.3 Distribuční deska na kontaktním poli

Jako třetí zapojení na kontaktním poli byla provedena distribuční deska s kterou bylo vyzkoušeno zapojení se všemi čtyřmi snímači. Po odstranění některých drobností v propojení celého zařízení se celý systém rozjel a mohlo být přistoupeno k výrobě její plošné oboustranná verze.



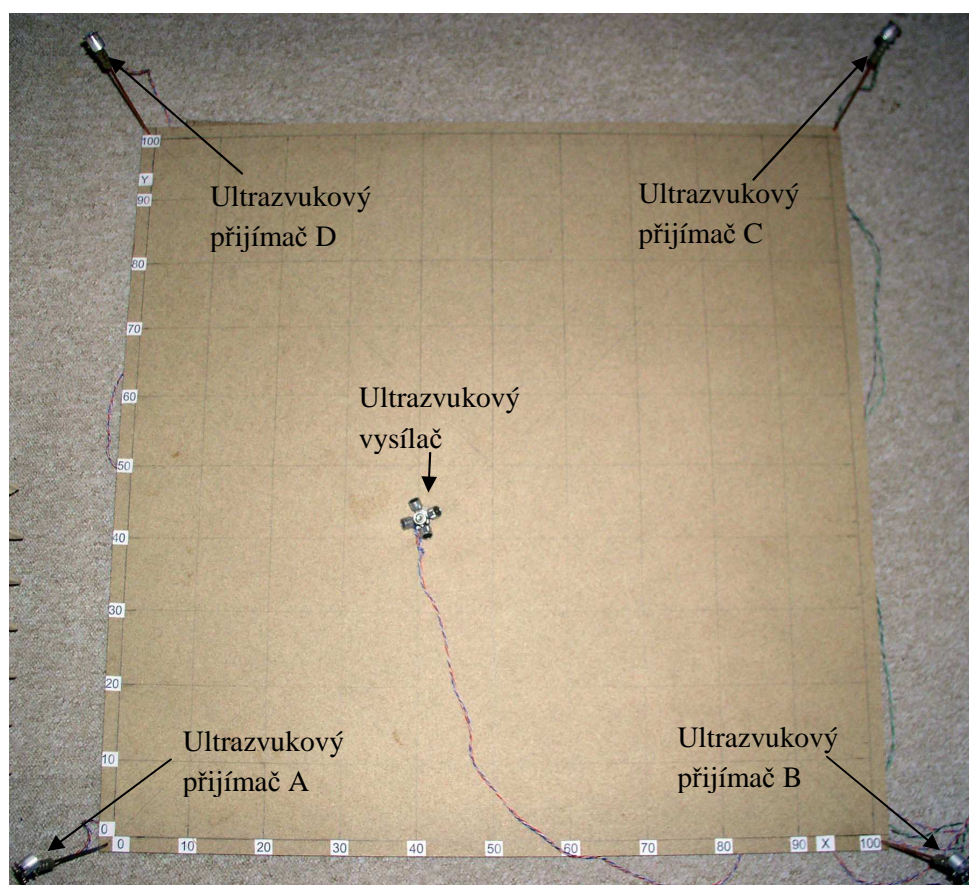
Obr. 10.3.1 Kontaktní pole s provizorním zapojením distribuční jednotky pro napojení již hotových přijímačů.

12 Vývojová verze a ověření systému

12.1 Sestava vývojové verze

Po předchozích dílčích zkouškách a postupném konstruování všech částí přišlo na sestavení celého zapojení vývojové verze na plošných spojích. Pro toto zkoušení je vyroben malý dřevotřískový model o rozměrech 104 x 104 cm, na němž je nakreslena aktivní oblast snímacího pole s úhlopříčkami a souřadnicemi co 10cm, takže vznikl měrný model pro vývojovou verzi zařízení. Do rohů byly umístěny přijímače na stojáncích tak, aby sestava maximálně odpovídala umístění ve větším měřítku v praxi. V našem případě je výška přijímače nad každým rohem 23cm. Vzdálenosti mezi přijímači jsou 100cm x 100cm v geometrickém uspořádání čtverce. V tomto čtverci se bude pohybovat vysílač vysílající podle řídicích pokynů hlavního mikrořadiče ultrazvukové značky.

Na obrázcích níže je tento model panelu zobrazen a pod ním je zobrazen i vysílač a přijímač. Z obrázku je patrná i jejich konstrukce.



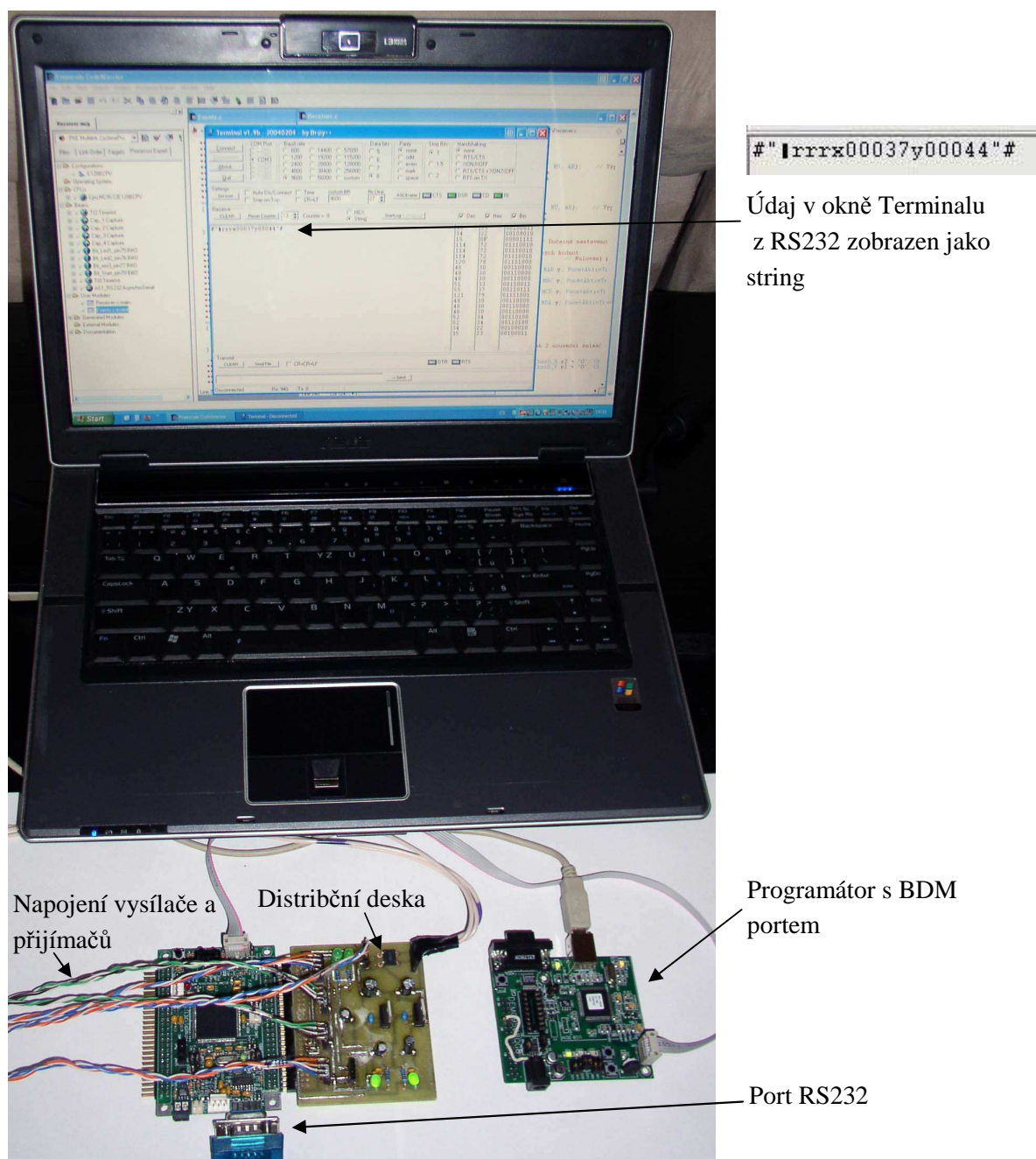
Obr. 12.1.1 Model snímacího prostoru o rozměrech 104x104cm (aktivní plocha 100x100cm).



Obr. 12.1.2 Vlevo ultrazvukový vysílač, vpravo ultrazvukový přijímač.

12.2 Ověření systému

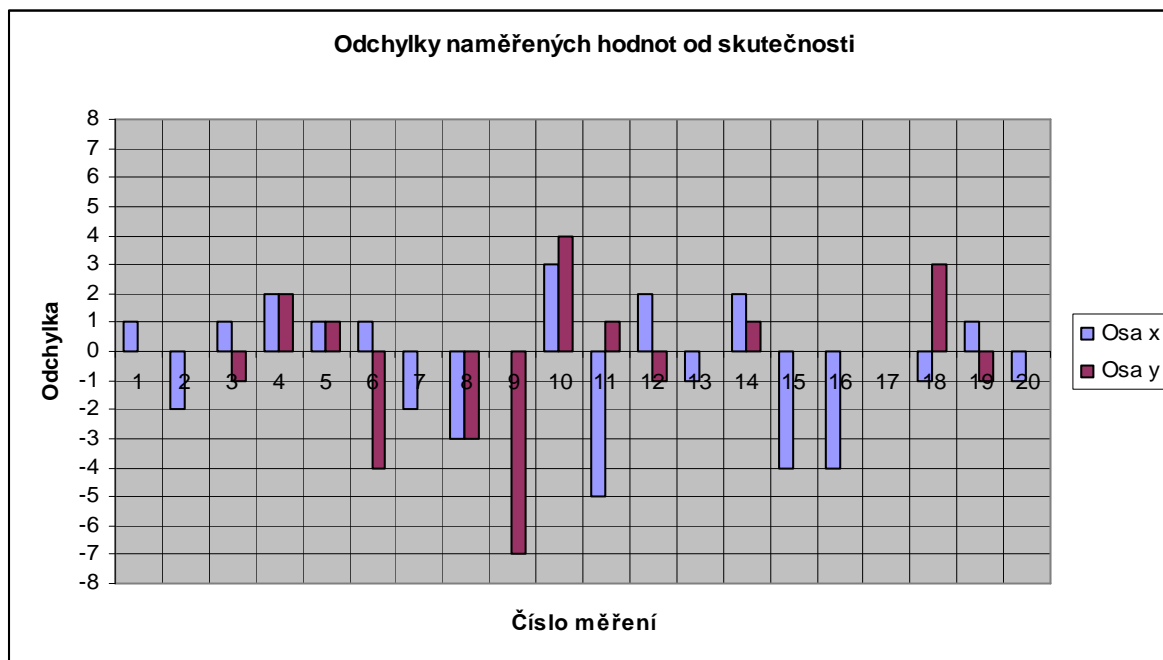
Systém běží po zapnutí naprosto nezávisle v měřicích cyklech. Na závěr každého cyklu je odeslán řetězec znaků na RS232, čehož bylo použito k vyhodnocení a ověření systému pomocí terminálu pro sériový port. V našem případě je použit „Terminál v1.9b“, který nabízí možnosti současného zobrazení znaků v decimální, hexadecimální i binární hodnotě a tím okamžitě po příchodu dat umožňuje rozpoznat současně jak souřadnice, tak snímače a strany podílející se na výpočtu.



Obr. 12.2.1 Snímání dat z modelu po RS232.

číslo měření	Nastavení mobilního objektu na souřadnice		Nasnímaná hodnota souřadnic		Strany podílející se na výpočtu finální hodnoty				Počet aktivních signálů	Chyba v cm nebo %	
	x	y	x	y						x	y
1	50	50	49	50	AB	BC	CD	DA	4	1	0
2	25	50	27	50	x	x	x	DA	2	-2	0
3	50	25	49	26	AB	x	x	DA	3	1	-1
4	75	75	73	73	x	x	CD	DA	3	2	2
5	25	75	24	74	AB	x	x	DA	3	1	1
6	75	25	74	29	x	BC	x	x	2	1	-4
7	25	25	27	25	x	x	x	DA	2	-2	0
8	5	5	8	8	AB	x	x	DA	3	-3	-3
9	95	5	95	12	AB	x	x	DA	3	0	-7
10	95	95	92	91	x	BC	CD	x	2	3	4
11	5	95	10	94	x	BC	CD	x	2	-5	1
12	40	30	38	31	x	x	CD	DA	2	2	-1
13	20	40	21	40	AB	BC	CD	DA	4	-1	0
14	70	60	68	59	x	BC	CD	x	3	2	1
15	30	40	34	40	x	x	x	DA	2	-4	0
16	5	50	9	50	AB	BC	CD	DA	4	-4	0
17	45	85	45	85	AB	x	x	x	2	0	0
18	85	65	86	62	x	x	CD	DA	3	-1	3
19	60	30	59	31	AB	x	x	DA	3	1	-1
20	20	70	21	70	AB	BC	CD	DA	4	-1	0
Průměrná chyba v cm nebo %										1,65	

Obr. 12.2.2 tabulka s nasnímanými daty z RS232



Obr. 12.2.3 Graf zobrazující odchylku měřených bodů x a y na společné ose.

Z této tabulky je zřejmé, že nejpřesnější jsou hodnoty, jež byly snímány všemi čtyřmi přijímači (viz vyznačení v tabulce), které leží ve vnitřním pásmu čtverce souřadnic $x = 10\text{cm}$ až 90cm a $y = 10\text{cm}$ až 90cm . Hodnoty nasnímané třemi a dvěma snímači, mají vzhledem k menšímu počtu upřesňujících výpočtů menší přesnost. V tabulce na konci je také uvedena odchylka

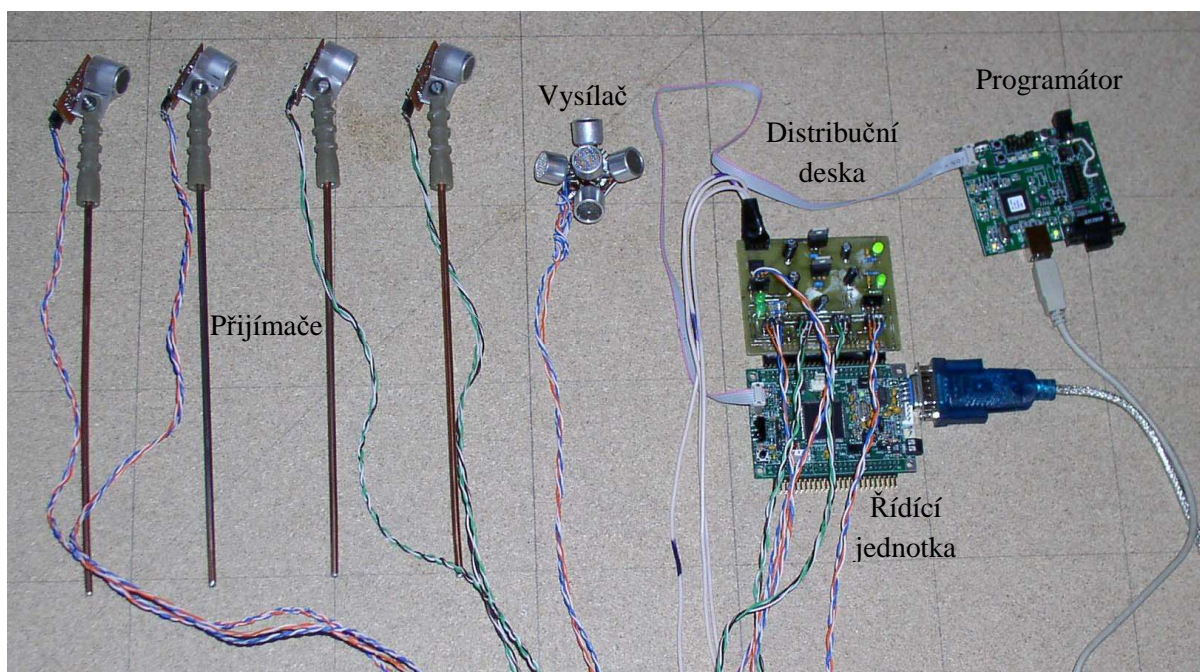
v centimetrech a jelikož je délka strany našeho čtverce shodná s procentuální stupnicí, je to zároveň hodnota v procentech.

Počet přijatých uz značek	Počet nezávislých výpočtů
4	4
3	2
2 (pouze sousedních)	1
1 a 0	0 (vyhodnocen ERROR)

Obr. 12.2.4 Tabulka zobrazuje počet dopočítávání přesnosti výsledné hodnoty.

Odchylka je značně ovlivněna poměrem velikosti vysílače (5cm) a velikostí snímací plochy (strana =100cm). Tato hodnota činí až 5% délky strany, což při snímání na méně než 4 přijímače nelze v algoritmu programu jednoznačně opravit, vzhledem k nerovnoměrnému vyzařování přijímače do stran (nevíme, z které strany přijímače byl zachycen signál). Pokud signál sejmou všechny čtyři přijímače, je počítaná pro každou stranu (dva snímané body AB, BC, CD, DA) stejným algoritmicko-matematickým postupem výška v trojúhelníku MAB, MBC, MCD, MDA, což je jedna souřadnice a pomocí ní se pak vypočítá druhá souřadnice, vždy ale ve vztahu k danému trojúhelníku, neboť jsou trojúhelníky vzájemně posunuty o 90°. Za základ je vzat trojúhelník MAB a dílčí x, y z ostatních trojúhelníků jsou přepočítány na x, y trojúhelníku MAB a hodnota poté zprůměrovaná, čímž se odstraní většina odchylek ve snímání a výpočtu.

V takto malém měřítku hrají rozměry vysílače podstatnou roli, protože se promítají do výsledku značným procentem v odchylce naměřených a vypočtených hodnot od skutečných. V modelu řádově kolem 10m x 10m by se již tyto rozměry vysílače (také vzhledem k velikosti pohybujícího se objektu) podílely na přesnosti zanedbatelnou mírou.



Obr. 12.2.5 Obrázek zachycuje všechny komponenty pohromadě.

13 Závěr

Téma této diplomové práce bylo vybráno ze zadaných témat diplomových prací a její teoretické a praktické řešení vzniklo za technické a metodické podpory katedry měřicí a řídicí techniky Vysoké školy Báňské - Technické univerzity Ostrava.

Na začátku práce byly původně uvažovány pro snímání a algoritmický výpočet vývojové desky se 16-bitovými signálovými MCU typu MC56F8323 nebo MC56F805, které zvláště po matematické stránce poskytují vysokou podporu. Ovšem jako problematické se ukázalo, že verze programátorů, kterými jsou programovány, disponují pouze paralelním portem, což znemožňovalo domácí práci pro absenci paralelního portu na mém notebooku. Pro tuto práci byla tedy vybrána 16-bitová verze MCU z rodiny HCS12 typ MC9S12E128 s možností programování pomocí programátoru s USB portem. Pro rychlejší chod tohoto MCU byla definovaná funkce odmocniny vlastním postupem pomocí Newtonovy metody. Pro násobení bylo použito z důvodů 16-bitového mikrořadiče, pokud možno jen typ integer, což vedlo k použití přepočtených hodnot na centimetry a následným výpočtem. Toto se nutně po algoritmickém výpočtu projevilo ztrátou centimetrové přesnosti, protože se počítalo s čísly od 0 do 150 (cm) místo 0 do 1500 (mm) a teprve potom s koncovým převodem na cm.

Tato diplomová práce obsahuje velký podíl vývojové práce na nepájivých kontaktních polích a současně s tím probíhala konstrukce první vývojové verze na oboustranných plošných spojích, z které vzešly poznatky a zkušenosti pro možnou konstrukci druhé plošné verze, kde je možné odstranit zjištěné nedostatky, které se objevují u první verze.

Největšího nedostatku bylo zjištěno u přijímacích uz měničů, které mají příliš malou citlivost (začínají ztrácet impulsy při hodnotách pod 70mV na měniči) a úzkou směrovou charakteristiku (55° dle katalogu), což vede k vysokému nutnému vyzařovacímu výkonu ultrazvukového vysílače a ke slepým příjmovým úhlům. Pokud se nedosáhne dostatečného výkonu ve všech směrech, má to za následek snížení přesnosti výsledku, kdy se provede výpočet pouze s třemi či dvěmi hodnotami nebo dokonce až výpadek výpočtu při ztrátě tří nebo všech hodnot ve snímání. Vysílací měniče mají celkem dobrou účinnost, ale úzký vyzařovací úhel (55°), což vede k velkému počtu použitých zářičů ve vysílači. Z toho následně vyplívají větší rozměry vysílače vzhledem k rozměrům snímané plochy, která by měla mít strany alespoň několika metrové a kdy by bylo možné rozměr vysílače zanedbat. V úvahu přichází také jiná konstrukce vysílací hlavy či použití jiných typů ultrazvukových zářičů.

Pro výpočty v reálném čase, kdy by bylo potřebné provést minimálně několik snímacích a výpočtových cyklů a více, by bylo vhodnější použít 32-bitových MCU s podporou aritmeticko-matematických výpočtů. Na použité vývojové desce MCU je použit již z výroby 8MHz krystal, který také limituje počet cyklů snímání, jinak tento procesor podporuje frekvence až do 50MHz, což by umožňovalo zvýšit počet cyklů až 6x.

Chyby mezi skutečnými souřadnicemi mobilního objektu a nasnímanými souřadnicemi jsou uvedené v tabulce kapitoly 12.2. Průměrná chyba systému je 1,65 cm a jelikož model má snímací oblast o straně 100cm je procentuální chyba s ní shodná. Celková průměrná chyba 1,65% je velmi dobrým výsledkem vzhledem k problematice jež byla výše popsána. Pokud by se použilo většího modelu v kombinaci 32-bitovým signálovým MCU, byla by tato chyba mnohem menší.

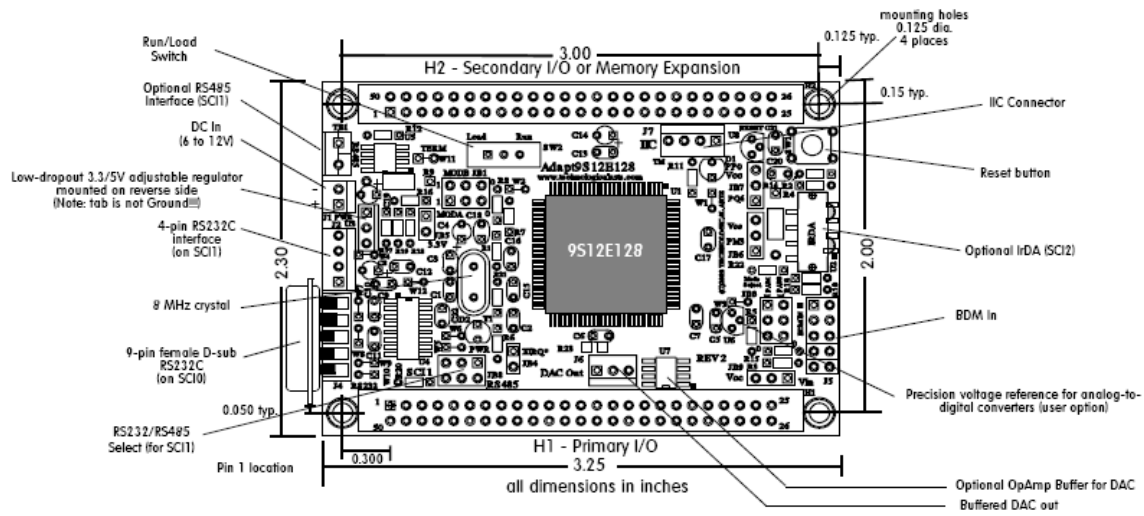
Vývojová verze zařízení pro snímání polohy je funkční, je schopna snímat polohu mobilního objektu a poskytovat výsledek v kartézském souřadnicovém systému to je souřadnicích (x, y). Když se odstraní výše uvedené nedostatky, doplní o některé účelové a podpůrné komponenty a funkce, bude jej možné nasadit v některé z aplikací ke zjišťování polohy.

14 Použitá literatura

- | | | |
|---|-----------|---|
| [1] http://cs.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System | (12/2008) | 2.1 |
| [2] http://cs.wikipedia.org/wiki/Glonass | (12/2008) | 2.1 |
| [3] http://www.czechspace.cz/cs/galileo/program-galileo | (12/2008) | 2.1 |
| [4] http://www.mobilmania.cz/Titulni-strana/Uz-vim-jak-pracuje-navigacni-system-GPS/Historie-satelitni-system-signaly/sc-21-sr-1-a-1111127-ch-1030452/default.aspx | (12/2008) | 2.1 |
| [5] http://www.med.muni.cz/~vmornst/ultrazv.htm | (02/2008) | 4.1 |
| [6] Matematicko-fyzikální tabulky | | 4.1 |
| [7] Datové listy MC9S08QG8 | | 8.1 |
| [8] Datové listy MC9S12E128 | | 8.1 |
| [9] Datové listy Adapt9S12E128 | | 8.1 |
| [10] Datové listy UST40R, UST 40T | | 8.1 9.1 |

Seznam příloh

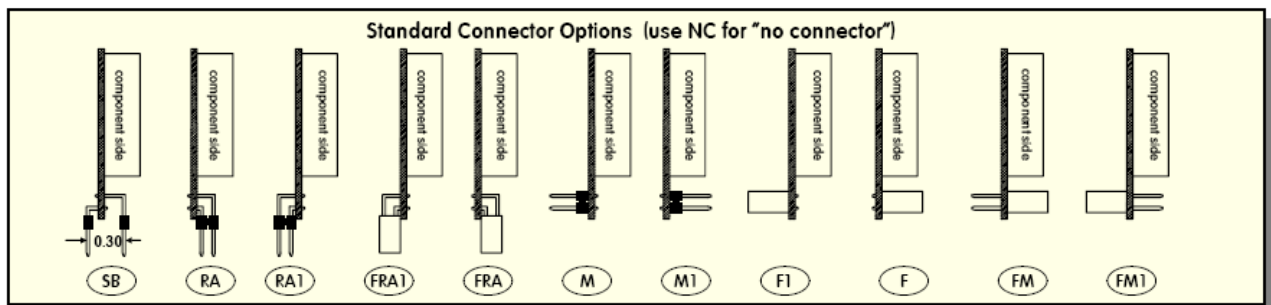
- Zapojení pinů konektoru H1 a H2 na desce Adapt9S12E128



Adapt9S12E128™ CONNECTOR PINOUTS

H1			H2				
PIN	SIGNAL NAME	PIN	SIGNAL NAME	PIN	SIGNAL NAME	PIN	SIGNAL NAME
1	PS4/MISO	50	GROUND	1	PA7/ADDR15/DATA15	50	VCC (+5VDC)
2	PS5/MOSI	49	GROUND	2	PA6/ADDR14/DATA14	49	GROUND
3	PS6/SCK	48	PS0/RXD0	3	PA5/ADDR13/DATA13	48	PK7/ECS*
4	PS7/SS*	47	+5VDC	4	PA4/ADDR12/DATA12	47	PK6/XCS*
5	PS1/TXD0	46	PE1/IRQ*	5	PA3/ADDR11/DATA11	46	PK5/XADDR19
6	PT7/IOC17	45	PE0/XIRQ*	6	PA2/ADDR10/DATA10	45	PK4/XADDR18
7	PT6/IOC16	44	RESET*	7	PA1/ADDR9/DATA9	44	PK3/XADDR17
8	PT5/IOC15	43	PE7/NOACC/XCLKS*	8	PA0/ADDR8/DATA8	43	PK2/XADDR16
9	PT4/IOC14	42	PU0/PWM10/IOC24	9	PB7/ADDR7/DATA7	42	PK1/XADDR15
10	PT3/IOC07	41	PU1/PWM11/IOC25	10	PB6/ADDR6/DATA6	41	PK0/XADDR14
11	PT2/IOC06	40	PU2/PWM12/IOC26	11	PB5/ADDR5/DATA5	40	PQ0/FAULT0
12	PT1/IOC05	39	PU3/PWM13/IOC27	12	PB4/ADDR4/DATA4	39	PQ1/FAULT1
13	PT0/IOC04	38	PU4/PWM14	13	PB3/ADDR3/DATA3	38	PQ2/FAULT2
14	PM1/DAC1	37	PU5/PWM15	14	PB2/ADDR2/DATA2	37	PQ3/FAULT3
15	PM0/DAC0	36	PU6	15	PB1/ADDR1/DATA1	36	PQ4/IS0*
16	PP5/PMF5	35	PU7	16	PB0/ADDR0/DATA0	35	PQ5/IS1*
17	PP4/PMF4	34	PS2/RXD1	17	R/W*/PE2	34	PQ6/IS2*
18	PP3/PMF3	33	PE4/ECLK	18	ECLK/PE4	33	PM3
19	PP2/PMF2	32	PS3/TXD1	19	LSTRB*/PE3	32	PM4/RXD2
20	PP1/PMF1	31	VRL	20	IRQ*/PE1	31	PM5/TXD2
21	PP0/PMF0	30	VRH	21	PM7/SCL	30	PM6/SDA
22	PAD0/KWAD0	29	PAD4/KWAD4	22	PAD8/KWAD8	29	PAD12/KWAD12
23	PAD1/KWAD1	28	PAD5/KWAD5	23	PAD9/KWAD9	28	PAD13/KWAD13
24	PAD2/KWAD2	27	PAD6/KWAD6	24	PAD10/KWAD10	27	PAD14/KWAD14
25	PAD3/KWAD3	26	PAD7/KWAD7	25	PAD11/KWAD11	26	PAD15/KWAD15

NOTES: * indicates active low signal

Order Codes (fill in ☐ with desired connector options for H1 and H2):Basic Module (2 x RS232, 0 x IRDA, 0 x RS485, 0 x Op Amp): AD9S12E128M0-☐-☐Fully-populated Module (1 x RS232, 1 x IRDA, 1 x RS485, 1 x OpAmp): AD9S12E128M-☐-☐

Evaluation Package (AD9S12E128M-RA1-RA1, DC power supply, prototyping cards, serial cable, etc.): AD9S12E128EVP

www.technologicalarts.com • sales@technologicalarts.com • phone: (416) 963-8996 • fax: (416) 963-9179

©2003 Technological Arts Specifications subject to change without notice

AD9S12E128DAT2a